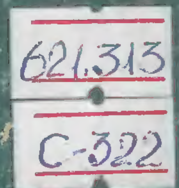
П. С. СЕРГЕЕВ Н. В. ВИНОГРАДОВ Ф. А. ГОРЯИНОВ



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



П. С. СЕРГЕЕВ, Н. В. ВИНОГРАДОВ, Ф. А. ГОРЯИНОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Под общей редакцией
П. С. СЕРГЕЕВА





ЭНЕРГИЯ
МОСКВА 1970

6П2.12
С32
УДК 621.313.001.2 (075.8)

Сергеев П. С. и др.

С32 Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1970.

632 с. с илл.

Перед загл. авт.: П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов

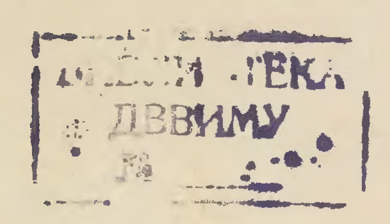
В книге рассматриваются основные вопросы проектирования нормальных электрических машин. В ней изложены основы электромагнитных, механических, вентиляционных и тепловых расчетов машин постоянного и переменного тока, а также вопросы их конструирования. Рассмотрены особенности проектирования турбогенераторов и гидрогенераторов.

Приведены расчетные формулы и необходимые для практических расчетов вспомогательные материалы, состоящие из таблиц, кривых и ГОСТ. Изложенные методы поясняются на примерах расчета генератора и двигателя постоянного тока, асинхронных двигателей с контактными кольцами и короткозамкнутых с различным выполнением обмотки ротора, синхронных генератора и двигателя.

Книга в основном предназначается в качестве учебного пособия для студентов электротехнических факультетов энергетических и других институтов.

3-3-10
127-69

6П2.12



Сергеев Петр Сергеевич,
Виноградов Николай Владимирович;
Горяинов Федор Алексеевич

Проектирование электрических машин

Редактор *А. И. Абрамов*

Технический редактор *Н. В. Сергеев* Корректор *В. С. Антипова*

Сдано в набор 28/II 1969 г. Подписано к печати 18/XII 1969 г. Т-10900.
Формат $70\times108^{1}/_{16}$. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 55,3. Уч.-изд. л. 58,4.
Доп. тираж 20.000 экз. Цена 3 р. 02 к Зак. № 441.
Издательство «Энергия», Москва, Ж-114. Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава девятая

Конструирование и механические расчеты основных деталей электрических машин

Глава десятая

Охлаждение электрических машин

Глава одиннадцатая

Тепловой расчет электрических машин

Глава двенадцатая

Расчет машин постоянного тока

Глава тринадцатая

Расчет асинхронных машин

Глава четырнадцатая

Расчет синхронных машин

Приложения

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее, третье, издание книги подверглось значительной переработке. Оно дополнено новыми сведениями по изоляционным материалам, выполнению изоляции обмоток, расчету магнитной цепи и параметров электрических машин, проектированию крупных синхронных машин (гидро- и турбогенераторов) и другим вопросам.

Книга в основном имеет учебное назначение — служить учебным пособием для студентов электротехнических факультетов энергетических и других институтов.

Вначале, как и в предыдущих изданиях, рассматриваются общие вопросы расчета и конструирования электрических машин (гл. 1—11), и затем — вопросы проектирования отдельных их видов (гл. 12—14). При таком порядке изложения авторы стремились задачу проектирования электрических машин представить в обобщенном виде и избежать повторений.

Основное внимание в книге уделяется нормальным машинам, которые при современных способах производства объединяются в серии. В связи с этим затронуты также вопросы проектирования серий машин. При этом задача проектирования электрической машины представлена в соответствии с тем, как она ставится и решается на практике, в реальных условиях.

В книге систематизированы вспомогательные материалы, состоящие из таблиц и кривых, необходимых при практических расчетах. Такие материалы, собранные в одной книге, должны облегчить работу и сэкономить время при выполнении проекта.

При составлении книги авторы использовали современную отечественную и зарубежную литературу по расчету электрических машин, а также материалы научно-исследовательских институтов и электромашиностроительных заводов СССР. Машины этих заводов в достаточной степени характеризуют современное состояние электромашиностроения.

Проектирование электрических машин охватывает очень большой круг вопросов, поэтому не представлялось возможным некоторые из них осветить подробно в одной книге. Дополнительные сведения можно получить из литературы, список которой приведен в конце книги.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность доктору технических наук, проф. А. В. Иванову-Смоленскому за ценные замечания, изложенные им в рецензии на рукопись книги, а также канд. техн. наук, доценту А. И. Абрамову за помощь в работе по подготовке рукописи к печати.

Работа между авторами была распределена следующим образом: гл. 9 написана Н. В. Виноградовым и им же составлены приложения IX—XII, гл. 3, 10, 11 (за исключением § 11-8), 12 и приложение VI — Ф. А. Горяиновым, все остальное — П. С. Сергеевым. Общее редактирование книги было проведено П. С. Сергеевым.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование электрической машины включает в себя выбор и расчет размеров ее статора и ротора, обмоток, изоляции, конструктивных деталей, объединение их в конструктивные узлы и общую компоновку всех ее частей. При этом также выбираются материалы для отдельных частей машины.

Материалы, размеры и формы конструктивных деталей должны быть так выбраны и отдельные детали так объединены, чтобы машина по возможности наилучшим образом соответствовала своему назначению и была наиболее экономичной в работе и изготовлении.

Проектирование электрической машины представляет собой сложную задачу. Для ее разрешения требуются глубокие теоретические знания, многие опытные данные и достаточно подробные сведения о назначении машины и условиях, в которых она будет работать.

При проектировании электрической машины, как будет видно из последующего, приходится учитывать большое количество факторов, от которых зависят ее эксплуатационные свойства, заводская себестоимость и надежность в работе.

Можно было бы найти оптимальный или близкий к нему вариант проекта путем расчета и сопоставления многих вариантов. Однако современные методы расчета позволяют при сравнительно небольшой затрате труда подойти довольно близко к оптимальному варианту. Эти методы создавались на основе большого опыта построения и длительной эксплуатации электрических машин, глубоких теоретических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в них.

Много было сделано в отношении разработки методов расчета электрических машин и выбора конструктивных форм для них нашим соотечественником М. О. Доливо-Добровольским и его современниками. Первые машины по их проектам были построены в начале 90-х годов прошлого столетия. Если сравнить машины того времени с современными, то прежде всего можно установить большое различие в их весе: современные машины в 3—4 раза легче. Объясняется это не только тем, что повысилось качество материалов, но и главным образом тем, что теперь научились более рационально их использовать и применять для машин лучшее охлаждение. Последнее обстоятельство необходимо особо отметить, так как прогресс в построении электрических машин тесно связан с развитием и усовершенствованием способов их охлаждения.

В результате накопления опытного материала и развития теории методы расчета электрических машин делаются все более точными. Однако предстоит еще большая работа по их дальнейшему уточнению, особенно в отношении расчета добавочных потерь, вентиляционных и тепловых расчетов и в связи с необходимостью проектировать машины, предназначаемые для массового или серийного изготовления.

По мере развития техники, улучшения материалов, накопления опыта, углубления теоретических знаний представляется возможным проектировать и строить более совершенные машины как по техническим, так и по экономическим показателям. В связи с этим возникает необходимость пересмотра существующих серий машин в отношении

«нагрузок» их электрической и магнитной частей, применения новых материалов, более рациональных соотношений размеров. Следовательно, возникает необходимость проектирования новых серий машин. Некоторые вопросы такого проектирования будут затронуты.

Задача проектирования серии электрических машин, т. е. ряда машин возрастающей мощности, объединенных общностью конструкции и технологических методов производства и предназначенных для массового или серийного изготовления, может быть правильно разрешена только в условиях планового социалистического хозяйства. В таких условиях возможно создание единых серий электрических машин для всех отечественных заводов, изготовление которых должно дать большие экономические выгоды и вместе с тем обеспечить их высокие технико-экономические показатели.

В настоящее время в СССР выпускаются серии машин, удовлетворяющих потребности электрических станций, промышленности, электрифицированного транспорта, строительства, сельского хозяйства. Но некоторые из них требуют дальнейших усовершенствований. Большое внимание должно уделяться сериям машин общепромышленного применения, какими являются, например, трехфазные асинхронные двигатели мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Общая мощность таких двигателей, находящихся в различных установках, достигает 40—50% установленной мощности электрических станций.

При проектировании выбор материалов, размеров активных и конструктивных частей машины должен быть технически и экономически обоснован. При этом следует использовать предшествующий опыт и ориентироваться на данные современных машин. Однако необходимо критически относиться к этим данным, выявить недостатки машин и найти способы их устранения.

Приведенные в гл. 12—14 указания по выбору тех или других величин и размерных соотношений не следует рассматривать как обязательные. Хотя они и соответствуют данным современных машин, удовлетворяющих техническим и экономическим требованиям, необходимо все же иметь в виду, что в современных машинах еще не использованы возможности, которые выявляются в связи с улучшением материалов и с результатами новых теоретических и экспериментальных исследований. При проектировании всегда необходимы инициатива и творческое решение возникающих задач, основанные на данных практики и теории.

Ограниченный объем книги не позволил более подробно осветить вопросы вентиляционного и теплового расчетов, а также вопросы конструирования и механических расчетов гидро- и турбогенераторов. Более подробные сведения по этим вопросам можно получить, обращаясь к соответствующей литературе [Л. 75—78, 111, 114].

Как отмечалось, при проектировании электрической машины приходится иметь дело с большим количеством вариантов, из которых необходимо выбрать оптимальный или близкий к нему. Однако не всегда можно точно установить критерии для оценки вариантов и, следовательно, решить, какой из вариантов будет оптимальным. Несомненно, что в основу выбора вариантов должны быть положены экономические показатели.

Имея в виду общее определение, можно считать, что оптимальным вариантом проекта будет вариант, при котором удовлетворяются все технические требования при «наименьших общих затратах». Под последними следует понимать не только стоимость материалов и изготовления машины, но и стоимость ее эксплуатации.

Стоимость материалов (и полуфабрикатов, получаемых заводом) должна определяться установленными на них ценами.

Стоимость эксплуатации зависит от к. п. д., $\cos\varphi$, простоты обслуживания, надежности в работе (целесообразного срока безотказной ра-

боты в нормальных условиях эксплуатации).

Что касается затрат на изготовление, то они в большой степени зависят от общей организации производства, технологических методов изготовления отдельных частей машины.

Более сложной и ответственной является задача проектирования серии машин. Здесь также трудно установить точный «критерий оптимальности». Однако если за такой критерий принять наименьшие общие затраты, учитывающие заводскую стоимость вместе с процентами на амортизацию и капиталовложения (на восстановление и расширение производства), стоимость эксплуатации в течение определенного срока работы (например, 5—7 лет), то можно найти оптимальные варианты при помощи современной вычислительной техники [Л. 19]. При этом используется электронная цифровая вычислительная машина (ЭЦВМ), которая позволяет при правильно составленной программе (логической схеме) вычислений получить основные размеры и обмоточные данные оптимальных машин.

В последние годы ЭЦВМ находит все более широкое применение не только для расчета серии машин, но и для решения задач, относящихся к тепловым и вентиляционным расчетам, расчетам успокоительных (пусковых) клеток синхронных машин, критических скоростей турбогенераторов, пусковых характеристик двигателей и др. [Л. 20].

Вопросы проектирования электрических машин теснейшим образом связаны с технологией их изготовления, что всегда следует учитывать.

При работе над проектом следует обращаться к соответствующей технической литературе, которая в Советском Союзе становится всё более обширной. Отметим здесь книги по проектированию и производству отдельных видов электрических машин, где широко представлены современные заводские данные [Л. 75, 88, 89, 111, 114].

Много полезных сведений можно почерпнуть из сборников «Электросила», издаваемых в Ленинграде фирмой «Электросила», и журналов «Электротехническая промышленность», издаваемых в Москве Информэлектро. Рекомендуется также обращаться к справочникам и заводским каталогам, большое количество которых выпускается в Советском Союзе в последние годы. Здесь можно найти чертежи машин, их деталей и наглядное описание их конструкций.

Экономические вопросы (например, определение заводской себестоимости машины, эффективности внедрения новых серий электрических машин в народное хозяйство), связанные с ценами на материалы и полуфабрикаты, а также с организацией производства и его экономической структурой, не могли быть в должной мере рассмотрены в этой книге из-за относительной сложности и громоздкости этих вопросов. Их рассмотрение должно составить содержание специального пособия по экономическим расчетам при проектировании электрических машин.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Главными размерами электрической машины называются диаметр якоря D и его длина l, причем для машин постоянного тока имеется в виду внешний диаметр якоря (ротора), а для асинхронных и синхронных машин в их обычном исполнении — внутренний диаметр статора.

Размеры D и l при данном числе полюсов главным образом и определяют все прочие размеры машины: размеры полюсов, внешний диаметр статора, размеры вала, подшипниковых щитов и др. От размеров D и l и соотношения между ними зависят вес машины и ее стоимость, а также ее технико-экономические характеристики и надежность в работе. Поэтому определение главных размеров D и l следует рассматривать как основной этап в проектировании электрической машины.

Размеры D и l зависят от мощности машины, ее скорости вращения n *об/мин* и «нагрузок», выбранных для ее магнитной системы и электрической части. Нагрузка (или использование) магнитной системы определяется в основном значением магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре, а нагрузка (или использование) электрической части — значением линейной нагрузки A *а/см* *.

1-1. «МАШИННАЯ ПОСТОЯННАЯ». КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Связь между указанными величинами устанавливается следующим образом.

Определяем *расчетную мощность машины:*

$$P' = mEI \cdot 10^{-3}, \text{ ква или квт}, \quad (1\text{-}1)$$

где m — число фаз;

E — э. д. с. якоря, *в*;

I — ток якоря, *а* (для машины постоянного тока $m=1$; для асинхронных и синхронных машин в их обычном исполнении E и I — фазные э. д. с. и ток статорной обмотки).

Электродвижущая сила якоря (или статора)

$$E = 4k_B f k_o w \Phi \cdot 10^{-8}, \text{ в}, \quad (1\text{-}2)$$

где k_B — коэффициент, зависящий в основном от формы кривой поля (при синусоидальном поле $k_B=1{,}11$);

$$f = \frac{pn}{60}, \text{ гц} \quad (1\text{-}3)$$

— частота тока (p — число пар полюсов);

k_o — обмоточный коэффициент для первой гармонической кривой э. д. с. (для машин постоянного тока $k_B k_o = 1$);

w — число последовательно соединенных витков фазы (для машин постоянного тока w — число витков параллельной ветви якорной обмотки);

Φ — магнитный поток, определяемый по действительной кривой поля:

$$\Phi = \alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta, \text{ мкс}. \quad (1\text{-}4)$$

В формуле (1-4) α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекры-

* Для линейной нагрузки применяют также обозначение AS.

тия, равный отношению расчетной длины полюсной дуги к полюсному делению или отношению среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению

$$\left(\alpha_\delta = \frac{b_\delta}{\tau} = \frac{B_{\delta ср}}{B_\delta}\right);$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \ см \qquad (1\text{-}5)$$

— полюсное деление;

l_δ — расчетная длина якоря, *см*;

B_δ — максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*.

Линейная нагрузка

$$A = \frac{2mwI}{\pi D}, \ а/см. \qquad (1\text{-}6)$$

Подставив в (1-1) э. д. с. E из (1-2) и учитывая приведенные соотношения, получим:

$$\frac{D^2 l_\delta n}{P'} = \frac{6{,}1\cdot 10^{11}}{\alpha_\delta k_B k_о A B_\delta} = C_A. \qquad (1\text{-}7)$$

Величина C_A называется «машинной постоянной» Арнольда. Обратная величина $1/C_A = K_A$ называется коэффициентом использования (или коэффициентом Эссона). Расчетная длина якоря l_δ для машин без радиальных вентиляционных каналов мало отличается от действительной длины якоря l_1; при наличии радиальных вентиляционных каналов l_δ меньше l_1 для асинхронных машин примерно на 10—15%, для машин постоянного тока и синхронных — примерно на 5—10%. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ обычно лежит в пределах 0,63—0,72.

Расчетная мощность P' для различных видов машин определяется по заданной номинальной мощности $P_н$.

Для машин постоянного тока

$$P' = E_a I_a \cdot 10^{-3}, \ квт. \qquad (1\text{-}8)$$

Здесь: $E_a = k_U U_H$ и $I_a = k_I I_H$, где U_H и I_H — номинальные напряжение и ток; k_U учитывает внутреннее падение напряжения в якоре; k_I учитывает ток в параллельной обмотке возбуждения.

Для генераторов можно принять: $k_{Uг} = 1{,}08 \div 1{,}02$; $k_{Iг} = 1{,}06 \div 1{,}01$; $k_г = k_{Uг} k_{Iг} = 1{,}14 \div 1{,}03$ при P_H от 1 до 1 000 *квт;* следовательно,

$$P' = k_г U_н I_н \cdot 10^{-3} = k_г P_н, \ квт. \qquad (1\text{-}9)$$

Для двигателей

$k_{Uд} = 0{,}91 \div 0{,}98$; $k_{Iд} = 0{,}92 \div 0{,}99$; $k_д = k_{Uд} k_{Iд} = 0{,}84 \div 0{,}97$ при $P_н$ от 1 до 1 000 *квт*; следовательно,

$$P' = k_д U_н I_н \cdot 10^{-3} = k_д \frac{P_н}{\eta_н}, \ квт, \qquad (1\text{-}9а)$$

где $\eta_н$ — к. п. д. двигателя (см. § 12-3).

Для асинхронных двигателей

$$P' = mEI_н \cdot 10^{-3} = mk_E U_н I_н \cdot 10^{-3} = \frac{k_E P_н}{\eta_н \cos\varphi_н}, \ ква, \qquad (1\text{-}10)$$

где $k_E = 0{,}98 \div 0{,}93$ (см. рис. 6-9); значения $\eta_н$ и $\cos\varphi_н$ приведены в § 13-3.

Для синхронных генераторов

$$P' = mE_r I_н \cdot 10^{-3} = mk_E U_н I_н \cdot 10^{-3} = \frac{k_E P_н}{\cos\varphi_н}, \ ква^*. \qquad (1\text{-}11)$$

Коэффициент k_E зависит от заданного $\cos\varphi_н$ (см. § 14-13); если $P_н$ задана в киловольт-амперах, то $P' = k_E P_н$.

Для синхронных двигателей

$$P' = mE_r I_н \cdot 10^{-3} = mk_E U_н I_н \cdot 10^{-3} = \frac{k_E P_н}{\eta_н \cos\varphi_н}, \ ква, \qquad (1\text{-}12)$$

где k_E зависит от заданного $\cos\varphi_н$ (см. § 14-3); $\eta_н$ — к. п. д. синхронного двигателя (§ 14-3).

Соотношение (1-7) может служить как исходное при определении главных размеров электрической машины. Оно позволяет установить ряд важных зависимостей.

Величина $D^2 l_\delta$ определяет объем ротора и при данной скорости вращения от нее зависит объем стато-

* Для результирующей э. д. с. E_r применяют также обозначения E_δ, E_1.

ра. Следовательно, величина D^2l_δ/P' приближенно определяет объем машины на единицу мощности. Из (1-7) вытекает, что этот объем при неизменных A и B_δ обратно пропорционален скорости вращения n, т. е. размеры машины и ее вес уменьшаются с возрастанием n. Такая зависимость подтверждается практикой электромашиностроения для машин со скоростями вращения, при которых не получаются чрезмерные механические напряжения в их вращающихся частях.

Величины C_A и K_A в основном определяют использование активных материалов машины (обмоточных проводов и стали для сердечников статора и ротора). Величина C_A, *см³/ква·мин* определяет объем материалов на единицу энергии. Величина $K_A=1/C_A$, *ква·мин/см³* определяет плотность энергии, т. е. энергию на единицу объема.

Если написать (1-7) в следующем виде:

$$C_A=\frac{D^2l_\delta}{P'/n}=\frac{60}{2\pi}\cdot\frac{D^2l_\delta}{M'},\qquad(1\text{-}13)$$

где $M'=\frac{P'}{\omega}=\frac{60}{2\pi}\cdot\frac{P'}{n}$ — расчетный вращающий момент, то можно видеть, что C_A определяет «объемный» расход материалов на единицу расчетного момента.

Для коэффициента использования $K_A=1/C_A$ получим:

$$K_A=\frac{2\pi}{60}\frac{M'}{D^2l_\delta};\qquad(1\text{-}14)$$

следовательно, K_A определяет расчетный момент на единицу объема.

О использовании материалов можно также судить по *удельному окружному усилию* σ_E — средней тангенциальной силе, действующей на единицу боковой цилиндрической поверхности якоря:

$$\sigma_E=\frac{F'}{\pi Dl_\delta}=\frac{M'}{\frac{D}{2}\pi Dl_\delta}=$$

$$=\frac{60}{\pi^2}\cdot\frac{P'}{D^2l_\delta n},\ \textit{кдж/м}^3,\qquad(1\text{-}15)$$

где P' — мощность, *квт* (или *ква*); D и l_δ — диаметр и длина, *м*.

Очевидно, что $\sigma_E\equiv K_A=1/C_A$.

Машинная постоянная C_A, как показывают данные выполненных машин, в действительности не остается постоянной: она с ростом мощности уменьшается. Следовательно, значения K_A и σ_E при возрастании мощности машины увеличиваются.

Для нормальных машин при номинальной мощности $P_н$ в пределах 1—1 000 *квт* значения $C_A\approx(100\div20)\cdot10^4$ и $K_A\approx(0{,}01\div0{,}05)\cdot10^{-4}$, если D и l_δ — в сантиметрах; если D и l_δ — в метрах, то $C_A=1\div0{,}2$, $K_A=1\div5$ и $\sigma_E\approx6\,K_A=(6\div30)$ *кдж/м³*. При $P_н<1$ *квт* обычно $C_A>100\cdot10^4$ и $K_A<0{,}01\cdot10^{-4}$.

Обратимся снова к уравнению (1-7) для C_A.

Мы можем считать, что здесь коэффициенты α_δ, k_B, k_o для нормальных машин практически остаются почти неизменными и, следовательно, размеры машины зависят в основном от электромагнитных нагрузок A и B_δ: чем больше эти нагрузки, тем меньше размеры ее. Этим и объясняется стремление выбирать для A и B_δ по возможности бóльшие значения.

Необходимо, однако, иметь в виду, что при чрезмерных значениях A и B_δ могут получиться недопустимые перегревы частей машины, ухудшение ее рабочих характеристик, трудности в изготовлении. Следует, кроме того, выбирать соотношение между A и B_δ в определенных пределах, так как от этого соотношения зависят рабочие характеристики машины.

Практика современного электромашиностроения и длительный опыт эксплуатации машин позволили установить целесообразные пределы, в которых лежат значения A и B_δ, чем и надлежит руководствоваться при выборе их. Они обычно выбираются в зависимости от τ или D.

Установленные практикой и опытом значения A и B_δ, конечно, не являются предельными: улучшение материалов (прежде всего электротехнической стали и изоляционных), выбор более рациональной геометрии машины (соотношений между

размерами), улучшение вентиляции, более совершенная технология позволят повысить использование машины или при сохранении той же мощности уменьшить ее размеры.

Покажем, что *удельная тепловая нагрузка цилиндрической поверхности якоря* $p'_э$, обусловленная электрическими потерями в его обмотке, зависит от A и плотности тока Δ *а/мм*², выбранной для проводников этой обмотки.

Электрические потери в проводниках обмотки на протяжении их пазовых частей

$$P'_э = m(2w) r' I^2 =$$

$$= m(2w) \rho \frac{l'}{s_п} I^2 = 2mw\rho l' I \Delta, \ вт,$$

где r' — сопротивление пазовой части проводника, *ом*;

ρ — удельное сопротивление проводникового материала (обычно меди), *ом*×*мм*²/*м*;

l' — длина пазовой части проводника, *м*;

$s_п$ — сечение проводника, *мм*² (приведенные равенства применимы для якорей всех машин).

Отсюда получаем:

$$p'_э = \frac{P'_э}{\pi D l} = \rho \frac{2mwI}{\pi D} \cdot \frac{l'}{l} \Delta =$$

$$= \frac{\rho}{100} \Delta A, \ вт/см^2, \qquad (1\text{-}16)$$

где D и l (длина пазовой части проводника) — в сантиметрах.

Допустимое значение $p'_э$ зависит главным образом от условий охлаждения машины. От $p'_э$ зависит «перепад температуры» в пазовой изоляции (разность температур меди проводников и стенок паза), который в машинах на линейное напряжение $U_{н.л} \geq 6\,000$ *в* обычно составляет существенную часть общего превышения температуры обмотки статора (см. § 11-6).

Чем меньше выбранная линейная нагрузка A, тем большей может быть плотность тока Δ.

Величины A и B_δ выбираются в зависимости от мощности машины и скорости вращения или, точнее, от полюсного деления τ и окружной скорости ротора $v_р$: чем больше τ и $v_р$, тем бо́льшие значения могут быть взяты для A и B_δ.

Для машин малой мощности (с небольшим τ) приходится выбирать сравнительно небольшие значения A и B_δ. Здесь получается небольшой поток Ф [см. (1-4)] и, следовательно, для получения надлежащей э. д. с. требуется большое число проводников [см. (1-2)]. Укладка в пазы малых размеров большого числа тонких проводников ухудшает использование площади пазов, так как изоляция самих проводников и пазовая изоляция здесь занимают относительно много места. К тому же при малом радиусе окружности ротора приходится ограничивать глубину паза (обычно трапецеидального или грушевидного), чтобы его ширина в нижней части была не меньше примерно 2 *мм*. Все это заставляет уменьшать число проводников в пазу и, следовательно, A. При этом зубцы якоря все же получаются относительно узкими и для понижения индукции в них несколько снижают также B_δ. При уменьшенном значении A можно согласно (1-16) повысить Δ, что обычно и делается для малых машин.

1-2. СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ МАШИН

Рассмотрим ряд машин возрастающей мощности, геометрически подобных и имеющих одинаковые плотности тока и индукции. Под геометрически подобными машинами понимают машины, соответственные размеры которых находятся в одном и том же отношении (например, для двух геометрически подобных машин A и B имеем:

$$\frac{D_A}{D_B} = \frac{l_A}{l_B} = \frac{b_{пA}}{b_{пB}} = \frac{h_{пA}}{h_{пB}} \text{ и т. д.;}$$

здесь $b_п$ и $h_п$ — ширина и высота паза).

Расчетная мощность машины пропорциональна произведению э. д. с. и тока:

$$P' \equiv EI. \qquad (1\text{-}17)$$

При данных частоте и скорости вращения э. д. с. E пропорциональна числу витков w обмотки якоря и магнитному потоку Ф, наводящему э. д. с. в этой обмотке:

$$E \equiv w\Phi. \qquad (1\text{-}18)$$

Заменив Ф через BS_c, где B — индукция в сечении S_c стального участка магнитной цепи, получим:

$$E \equiv wBS_c. \qquad (1\text{-}19)$$

Ток $I = \Delta s_п$. Следовательно, вместо (1-17) может написать:

$$P' \equiv wBS_c\Delta s_п. \qquad (1\text{-}20)$$

Если обозначить общее сечение меди всех витков через

$$S_м = ws_п, \qquad (1\text{-}21)$$

то получим:

$$P' \equiv B\Delta S_c S_м. \qquad (1\text{-}22)$$

Площади S_c и $S_м$ пропорциональны квадрату линейного размера l (для геометрически подобных машин можно взять любой линейный размер машины); следовательно,

$$S_c S_м \equiv l^2 l^2 = l^4. \qquad (1\text{-}23)$$

Отсюда при постоянных значениях B и Δ

$$P' \equiv l^4, \qquad (1\text{-}24)$$

или

$$l \equiv P'^{\frac{1}{4}}. \qquad (1\text{-}25)$$

Веса активных материалов (меди и стали) пропорциональны их объему, т. е. кубу линейных размеров:

$$G \equiv l^3. \qquad (1\text{-}26)$$

Поэтому

$$G \equiv P'^{\frac{3}{4}}. \qquad (1\text{-}27)$$

Следовательно, вес машины при увеличении линейных размеров растет медленнее, чем ее мощность.

Можно считать, что стоимость C активных материалов и потери ΣP в них при заданных индукции и плотности тока пропорциональны весу:

$$C \equiv \Sigma P \doteq G \equiv l^3 \equiv P'^{\frac{3}{4}}. \qquad (1\text{-}28)$$

Если отнести вес, стоимость машины и ее потери к единице мощности, то получим:

$$\frac{G}{P'} \equiv \frac{C}{P'} \equiv \frac{\Sigma P}{P'} \equiv \frac{P'^{\frac{3}{4}}}{P'} \equiv$$

$$\equiv \frac{1}{\sqrt[4]{P'}}. \qquad (1\text{-}29)$$

Последние соотношения показывают, что вес и стоимость активных материалов на 1 *квт* или 1 *ква* и относительное значение потерь (электрических и магнитных потерь на единицу мощности) в ряде геометрически подобных машин изменяются обратно пропорционально корню четвертой степени из их мощности при сохранении постоянными значений Δ и B.

В ряде геометрически подобных машин возрастающей мощности скорость вращения их принимается постоянной; при этом вращающий момент M' пропорционален мощности:

$$M' \equiv P' \equiv l^4. \qquad (1\text{-}30)$$

Если рассматривать однотипные машины с разными скоростями вращения n, то для них можем написать:

$$P' \equiv M'n \equiv l^4 n, \qquad (1\text{-}31)$$

т. е. при одинаковых размерах и электромагнитных нагрузках мощность машины пропорциональна скорости вращения n, что следует также из (1-7). В действительности мощность машины при увеличении n до некоторого предела возрастает несколько быстрее, чем n, так как получающееся при этом улучшение условий охлаждения позволяет несколько повысить значения B и Δ.

Было показано [см. (1-28)], что потери машины растут пропорционально кубу линейных размеров ее. Но ее поверхности охлаждения возрастают пропорционально только квадрату линейных размеров. Поэтому при увеличении мощности машин приходится повышать интенсивность их охлаждения (усиливать вентиляцию) и отступать от геометрического подобия их форм

Следует отметить, что хотя относительное значение потерь в активных материалах с ростом мощности уменьшается, относительное значение механических и вентиляционных потерь при этом почти не изменяется. Это обстоятельство служит одной из причин резкого возрастания к. п. д. с ростом номинальной мощности малых машин и менее резкого возрастания к. п. д.

средних и особенно больших машин (см., например, рис. 13-3).

Приведенные соотношения (1-24) — (1-31) являются приближенными и дают только общую ориентировку при определении зависимости мощности машины, ее веса и потерь от размеров ее. Практически при проектировании ряда машин возрастающей мощности всегда приходится в той или иной мере от них отступать по причинам, обусловленным допустимыми перегревами, техническими требованиями в отношении рабочих характеристик, конструкцией, технологией изготовления и пр.

Если обратиться к (1-7), то для геометрически подобных машин при $B=\mathrm{const}$ и $\Delta=\mathrm{const}$ мы должны иметь $A \equiv l$, так как

$$A = \frac{2mwI}{\pi D} \equiv \frac{ws_\text{п}\Delta}{l} \equiv \frac{S_\text{м}}{l} \equiv \frac{l^2}{l} = l.$$

В действительности для сохранения в допустимых пределах удельной тепловой нагрузки якоря $p'_\text{э} = \frac{\rho}{100} A\Delta$ приходится в машинах средней и большой мощности брать $A \equiv l^\gamma$, где $\gamma<1$.

Анализ современных машин показывает, что при возрастании мощности Δ несколько уменьшается, но зато A и B_δ с ростом диаметра якоря увеличиваются: $AB_\delta \equiv D^\alpha$ при $n=\mathrm{const}$; при возрастании скорости вращения A и B_δ также увеличиваются: $AB_\delta \equiv n^\beta$ при $D=\mathrm{const}$. Отсюда имеем: $AB_\delta \equiv D^\alpha n^\beta$.

Если подставить последнее соотношение в (1-7), то получим выражение для новой «машинной постоянной»:

$$\frac{D^{2+\alpha}\, l_\delta\, n^{1+\beta}}{P'} = C_{\alpha.\beta}. \qquad (1\text{-}32)$$

Но и в таком виде она не является постоянной величиной для широкого диапазона изменений P' и n. Только для некоторых пределов изменений P' и n нормальных машин значения α и β можно приближенно принять постоянными. Например, для трехфазных асинхронных двигателей при мощностях:

до 0,6 *квт* $\alpha \approx 1$; $\beta \approx 0{,}2 \div 0{,}3$;

от 1 до 100 *квт* $\alpha \approx 0{,}85 \div 0{,}7$; $\beta \approx 0{,}2 \div 0{,}3$;

от 100 до 1 000 *квт* $\alpha \approx 0{,}5 \div 0{,}4$; $\beta \approx 0{,}2 \div 0{,}3$;

1 000 *квт* и выше $\alpha \approx 0{,}3 \div 0{,}2$; $\beta \approx 0{,}2$.

Мы не будем здесь приводить значений $C_{\alpha,\beta}$ для современных машин, так как они не являются достаточно показательными.

1-3. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Было показано, что размеры машины зависят от электромагнитных нагрузок A и B_δ. Если правильно выбраны A и B_δ, то из (1-7) можно найти $D^2 l_\delta$. Далее необходимо определить отдельные множители этого произведения. Определение D и l_δ основано на выборе отношения

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}. \qquad (1\text{-}33)$$

Выбор λ зависит от многих условий.

Для *нормальных машин постоянного тока* обычно выбирается $\lambda = 0{,}6 \div 1{,}5$. Чем больше λ, тем относительно более длинной получается машина. Длинные машины по расходу материалов получаются более дешевыми, так как в таких машинах несколько лучше используется обмоточная медь, чем в коротких машинах, и, кроме того, их несущие (конструктивные) части получаются более легкими. Но при этом ухудшаются условия коммутации из-за возрастания реактивной э. д. с. в коммутируемых секциях; ухудшаются также условия охлаждения, что заставляет в длинных машинах применять более сложную вентиляцию. Для малых машин часто приходится брать низкие значения λ ($<0{,}6$), чтобы можно было получить достаточное число пазов якоря при приемлемых для них размерах. В некоторых случаях приходится брать повышенное значение λ с целью получить небольшой маховой момент GD^2 и уменьшить время разбега машины и ее потери при пуске.

Для *асинхронных двигателей* небольшой мощности обычно $\lambda = 0{,}5 \div 1{,}2$; для больших машин $\lambda = 0{,}9 \div 2$, причем бо́льшие значения λ выбираются при большом числе полюсов. Перегрузочная способность двигателя (максимальный вращающий момент) и его $\cos\varphi$ зависят от λ: оптимальные значения получаются приблизительно при $\lambda = 1 \div 1{,}3$. Оптимальные машины по весу меди и потерям получаются при $\lambda = 1{,}5 \div 3$.

Выбор λ производится также с учетом принятой системы вентиляции При аксиальной вентиляции λ берется бо́льшим, чем при радиальной (при отсутствии радиальных каналов). Хотя радиальная вентиляция и требует несколько большего расхода материалов, но машина получается более надежной в работе вследствие более равномерного распределения нагрева ее по длине.

Для *явнополюсных синхронных машин* λ в большой степени зависит от числа полюсов. Для нормальных машин можно принять $\lambda = 0{,}9 \div 2$ (при мощностях 100—6 000 *квт*), причем высшие значения относятся к большому числу полюсов. В крупных гидрогенераторах при высоких угонных скоростях вращения приходится увеличивать λ (иногда до 4), а следовательно, уменьшать диаметр ротора, чтобы не получить чрезмерных окружных скоростей вращения. Наоборот, для машин, которые должны иметь повышенный момент инерции, приходится уменьшать λ, чтобы получить большой диаметр ротора.

Для крупных неявнополюсных синхронных машин — современных турбогенераторов при $2p = 2$ λ имеет довольно определенное значение, так как для них диаметр D в зависимости от мощности изменяется в узких пределах: например, при $P_н \geqslant 100$ *Мвт* $\lambda = 2{,}8 \div 3{,}5$ (см. гл. 14).

Таким образом, мы видим, что вопрос об определении соотношения между l_δ и τ, а при заданном числе полюсов, следовательно, соотношения между l_δ и D приходится решать с учетом многих обстоятельств. Вопрос этот разрешается главным образом на основе опытных данных, т. е. на основе данных рационально спроектированных машин, изготовление и эксплуатация которых подтвердили их высокие качества в отношении простоты и экономичности изготовления, надежности в работе, к. п. д., $\cos\varphi$ и других характеристик.

Более точные указания по выбору λ даются в дальнейшем при рассмотрении расчета отдельных видов машин.

1-4. О ПРОЕКТИРОВАНИИ ЕДИНИЧНОЙ МАШИНЫ И СЕРИИ МАШИН

На электромашиностроительном заводе редко приходится проектировать единичную, индивидуальную машину. Такую машину приходится проектировать только в том случае, если она резко отличается, например, по мощности, по своим характеристикам и конструкции от нормальных машин, для которых на заводе налажено серийное производство. Но и в этом случае необходимо бывает считаться с существующими на заводе нормалями (штампами, моделями, шаблонами, мерительным инструментом и т. п.) и так выбирать размеры машины, чтобы использовать эти нормали по возможности в большем количестве.

Обычно проектируется серия машин — ряд машин возрастающей мощности, объединенных общностью конструкции и технологии производства и предназначенных для серийного изготовления.

Проектирование серии машин представляет собой сложную и ответственную задачу, так как при этом приходится считаться со многими требованиями, часто противоречащими друг другу. Требуется, чтобы на изготовление машин пошло как можно меньше материалов, чтобы их изготовление было простым и дешевым, и в то же время необходимо, чтобы машины были надежны в работе и обладали характеристиками, не ху́дшими, чем предписанные ГОСТ.

Удовлетворить всем требованиям можно лишь частично, отступая несколько от оптимальных размерных соотношений, например, с точки зрения расхода материалов.

При проектировании серии машин большое значение имеют вопросы экономики и рациональной организации производства и его технология, с которыми тесно связаны вопросы унификации деталей и конструктивных узлов, нормализации деталей (сюда же относятся вопросы взаимозаменяемости) и т. п. Именно эти вопросы заставляют для асинхронных и синхронных ма-

шин выбирать внешние диаметры статора таким образом, чтобы можно было при одном внешнем диаметре получить несколько машин на различные мощности и скорости вращения при изменении только внутреннего диаметра и сохранении или небольшом изменении их длины (вместе с вылетами лобовых частей обмоток). Для машин на одно и то же число полюсов часто оставляют одни и те же внешний и внутренний диаметры статора и ротора для двух-трех смежных по мощности машин, изменяя только их длину.

Для машин постоянного тока также выбирают одинаковый диаметр якоря для нескольких мощностей и скоростей вращения, изменяя при этом только длину якоря.

В результате для ряда машин значительно сокращается количество штампов для штамповки листов статора, ротора или полюсов, уменьшается количество моделей для отливки станин, подшипниковых щитов, сохраняются одни и те же диаметры валов, подшипники, коллекторы, обмоткодержатели, значительно сокращается количество мерительного инструмента, технологической оснастки и т. п.

При выборе внешнего диаметра статора асинхронной и синхронной машин или якоря машины постоянного тока следует руководствоваться нормалями, обязательными для заводов Советского Союза. Они разработаны с учетом наиболее рационального раскроя листов электротехнической стали, имеющих стандартные размеры.

Нормализованные внешние диаметры D для якорей машин постоянного тока и внешние диаметры D_a для статоров асинхронных и синхронных машин приведены в табл. I-1, I-2 и I-3 (приложение I).

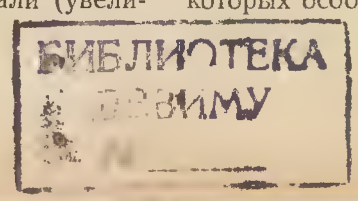
Приведенные нормализованные диаметры якорей и статоров выбраны для современных серий электрических машин. Однако они не являются обязательными на долгие годы. При пересмотре серий машин с целью их совершенствования, когда будет расширен сортамент электротехнической листовой стали (увеличится количество размеров листов), когда будет выпускаться рулонная листовая сталь различной ширины в достаточном количестве, можно будет выбирать более рациональные нормализованные диаметры (при рулонной стали в большей степени возможна автоматизация штамповочных работ).

Мы видели, что для одной и той же скорости вращения можно получить несколько асинхронных или синхронных машин при одних и тех же внешнем и внутреннем диаметрах статора путем изменения только его длины. При этом сохраняются корпус статора (станина), вал, подшипниковые щиты, а также размеры пазов статора независимо от его длины и напряжения машины. Очевидно, что для коротких машин в этом случае мы получим плохое использование материалов: не будут использованы по длине корпус статора и вал. При массовом или крупносерийном производстве, например, асинхронных двигателей мощностью от 0,6 до 100 *квт* это невыгодно. Поэтому для таких машин не следует брать больше двух длин.

При мелкосерийном производстве, когда ежегодный выпуск машин ограничен, например при мощностях от 100 до 1 000 *квт*, можно брать две-три длины статора, а для бо̀льших мощностей при сварном корпусе статора, позволяющем в производстве сравнительно легко изменять его длину, иногда берут три-четыре длины статора.

В серии машин постоянного тока каждому внешнему диаметру якоря соответствует один внутренний; при этом станина и штамп для полюса остаются одними и теми же для нескольких мощностей и скоростей вращения, но число пазов якоря и их размеры могут изменяться с изменением длины якоря и напряжения, что связано с наличием коллектора, ограничивающего выбор числа пазов.

При проектировании серии машин прежде всего имеются в виду *машины основного исполнения*. Это машины массового, общепромышленного применения, потребность в которых особенно велика, например



трехфазные асинхронные двигатели закрытой обдуваемой и защищенной конструкции от 0,6 до 100 *квт* с нормальными рабочими и пусковыми характеристиками.

На базе машин основного исполнения предусматриваются их модификации, например для асинхронных двигателей: многоскоростные, закрытые двигатели с радиаторным охлаждением, а также двигатели с повышенным начальным или максимальным моментом или с повышенным скольжением; для машин постоянного тока: зарядные генераторы (для зарядки аккумуляторных батарей), двигатели с более широким, чем в основном исполнении, диапазоном регулирования скорости вращения.

Во всех случаях при выборе основных размерных соотношений следует руководствоваться рекомендуемыми значениями λ, выбирая их в соответствии с принятой системой вентиляции и считаясь с необходимостью получить приемлемые значения λ для смежных типов, которые имеют одинаковый диаметр статора или якоря.

1-5. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

Проектированию машины или серии машин должно предшествовать составление проектного задания, в котором указываются номинальные величины машины (или машин), соответствующий ГОСТ или технические условия. Под заданными номинальными величинами понимаются мощность, напряжение, скорость вращения, частота тока, cos φ (для синхронных машин). Они определяют номинальный режим работы машины, для которого она предназначается.

В настоящее время Министерством электротехнической промышленности Советского Союза установлены твердые шкалы мощностей для нормальных машин постоянного тока, трехфазных асинхронных и синхронных машин (они приводятся соответственно в гл. 12, 13 и 14). Электромашиностроительные заводы должны выполнять такие машины на мощности, указанные в этих шкалах.

В данном параграфе указывается порядок (последовательность) расчета машины только в общем виде. Подробные указания даются в гл. 12, 13 и 14, где рассматриваются методы и порядок расчета отдельных видов машин, поясненные на примерах расчета.

Вначале определяются главные размеры D и l_δ, а для асинхронных и синхронных машин — также внешний диаметр статора D_a (D для машин постоянного тока, D_a для асинхронных и синхронных машин следует взять из приложения I). Диаметры должны выбираться с учетом необходимости их использования для одного или двух смежных по мощности типов при одной и той же скорости вращения; при этом следует руководствоваться таблицами (шкалами) принятых мощностей.

При выборе диаметров и длин для основного (заданного) и смежных типов целесообразно составить таблицу вариантов и из нее выбрать наиболее подходящий по значениям λ.

После выбора главных размеров асинхронного двигателя производятся расчет обмотки и определение размеров паза и высоты ярма статора, выбор воздушного зазора, расчет обмотки и определение размеров паза и ярма ротора и др.; для синхронных машин порядок расчета можно выбрать тот же самый: сначала рассчитать статор, выбрать воздушный зазор и затем перейти к проектированию ротора. Для машин постоянного тока следует вначале рассчитать обмотку якоря, его пазы и коллектор, а затем после выбора воздушного зазора рассчитать добавочные и главные полюсы, станину и обмотки возбуждения.

Определение главных размеров D и l_δ является начальным и, как отмечалось, основным этапом проектирования электрической машины; другие размеры ее активных частей определяются в процессе электромагнитного расчета. Последний включает в себя также расчет маг-

нитной цепи, определение параметров обмоток, потерь, к. п. д., рабочих и пусковых характеристик и т. д. Таким образом, проверяют, удовлетворяет ли машина при выбранных размерах заданным техническим условиям и соответствующим ГОСТ.

Далее производится тепловой расчет, т. е. определение превышений температуры ответственных частей машины. Для более точного теплового расчета следует предварительно наметить конструкцию машины и произвести вентиляционные расчеты. Если при этом получаются удовлетворительные результаты и нет необходимости в изменении каких-либо размеров и повторных расчетах, можно приступить к окончательному конструированию машины и механическим расчетам ее конструктивных деталей.

Проектирование серии машин проходит примерно следующие основные стадии:

1. **Составление проектного задания,** при котором должны быть учтены и согласованы требования различных отраслей промышленности, электрических станций, коммунальных предприятий, строительных организаций, сельского хозяйства и т. п.

2. **Эскизный проект** (составляется обычно вместе с проектным заданием), в котором выявляются возможности выполнения проектного задания; намечаются мощности, скорости вращения, напряжения машин и т. п.; устанавливаются их основные технико-экономические показатели; даются принципиальные обоснования целесообразности изготовления новой серии машин и эффективности внедрения ее в народное хозяйство.

3. **Технический проект,** содержащий более подробную разработку принятых в проектном задании и эскизном проекте решений; в него включаются чертежи машин (обычно общие виды), расчеты всех основных величин (к. п. д., $\cos \varphi$, рабочие характеристики, начальный и максимальный вращающие моменты, превышения температуры, данные вентиляционных и механических расчетов, веса активных и конструкционных материалов и др.), причем эти расчеты должны быть подкреплены опытными данными, полученными при испытании опытных образцов; здесь же намечаются и разрабатываются основные технологические процессы с соответствующими экономическими обоснованиями.

4. **Рабочие чертежи,** определяющие окончательные размеры всех машин серии и их деталей, а также уточняющие технико-экономические показатели.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

Стоимость, экономичность и надежность в работе электрической машины зависят не только от выбора размеров, конструкции, технологии производства и точности расчетов, но также от свойств материалов, из которых она изготовлена.

В электромашиностроении применяются следующие материалы: конструкционные, «активные» и изоляционные. Конструкционные материалы применяются для изготовления таких частей и деталей машин, которые служат главным образом для передачи и восприятия механических воздействий. Активные материалы служат в качестве магнитных и проводниковых (токопроводящих). Они и создают в машине необходимые условия, в которых протекают электромагнитные процессы. Изоляционные материалы предназначены для того, чтобы электрически изолировать токопроводящие части машины от других ее частей и друг от друга.

Некоторые части электрических машин работают в сложных физических условиях, поэтому к ряду материалов предъявляются требования, относящиеся одновременно как к механическим, так и к магнитным и электрическим их свойствам.

К конструкционным материалам относят чугун (простой, ковкий и немагнитный), сталь (литую и ковкую), цветные металлы и их сплавы, пластмассы. Эти материалы рассматриваются в дальнейшем в главе, посвященной вопросам конструирования и механического расчета деталей машин (см. гл. 9).

В данной главе рассматриваются материалы — активные (магнитные и проводниковые) и изоляционные; кроме того, приводятся основные характеристики обмоточных

проводов и щеток, применяемых для электрических машин.

2-1. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изготовления отдельных частей магнитной системы электрических машин применяются различные ферромагнитные материалы: листовая электротехническая сталь различных сортов, стальное литье, листовая (конструкционная) сталь, кованая сталь, чугун.

1. **Тонколистовая электротехническая сталь** согласно ГОСТ 802-58 разделяется на 28 марок. Из них находят применение в общем электромашиностроении главным образом следующие марки: Э11, Э12, Э13, Э21, Э22, Э31, Э32 и в более редких случаях Э41, Э42, Э43, Э43А, Э310, Э320, Э330, Э330А (обычно для крупных машин).

В обозначениях марок стали буква Э указывает, что сталь электротехническая, первая цифра показывает степень легирования стали кремнием, присадка которого снижает удельный вес и повышает удельное сопротивление стали, как это видно из табл. 2-1, где приведены усредненные значения указанных величин.

Таблица 2-1

Зависимость физических свойств электротехнической стали от содержания кремния

Первая цифра марки стали	1	2	3	4
Содержание кремния (Si), %	0,8—1,8	1,8—2,8	2,8—3,8*	3,8—4,8
Удельный вес, *г/см*^{3}	7,80	7,75	7,65	7,55
Удельное сопротивление, *ом · мм*^{2}*/м*	0,25	0,40	0,50	0,60
Температурный коэффициент сопротивления, 1/°C	0,0025	0,0015	0,001	0,0008
Удельная теплоемкость, *вт · сек/кг · град*	460	—	—	480

* Для Э310, Э320, Э330 2,8—3,5%.

Таблица 2-2

Марка стали	Толщина листа, *мм*	Магнитная индукция, *гс* (не менее), при напряженности поля, *а/см*					Удельные потери, *вт/кг* (не более)		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$p_{10/50}$	$p_{15/50}$	$p_{17/50}$
Э11	1,0	—	15 300	16 300	17 600	20 000	5,8	13,4	—
Э12	1,0	—	15 000	16 200	17 500	19 800	5,5	12,5	—
Э11	0,50	—	15 300	16 400	17 600	20 000	3,3	7,7	—
Э12	0,50	—	15 000	16 200	17 500	19 800	3,2	7,5	—
Э13	0,50	—	15 000	16 200	17 500	19 800	2,8	6,5	—
Э21	0,50	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,5	6,1	—
Э22	0,50	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,2	5,3	—
Э31	0,50	—	14 600	15 700	17 200	19 400	2,0	4,4	—
Э32	0,50	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,8	3,9	—
Э31	0,35	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,6	3,6	—
Э32	0,35	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,4	3,2	—
Э41	0,50	13 000	14 600	15 700	17 000	19 000	1,55	3,5	—
Э42	0,50	12 900	14 500	15 600	16 900	18 900	1,4	3,1	—
Э43	0,50	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,25	2,9	—
Э43А	0,50	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,15	2,7	—
Э41	0,35	13 000	14 600	15 700	17 000	19 000	1,35	3,0	—
Э42	0,35	12 900	14 500	15 600	16 900	18 900	1,2	2,8	—
Э43	0,35	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,05	2,5	—
Э43А	0,35	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	0,9	2,2	—
Э310	0,50	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	0,8	1,75	2,5
Э320	0,35	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,5	1,1	1,6

Применяются следующие названия для стали в соответствии с первой цифрой в обозначении ее марки: 1 — слаболегированная; 2 — среднелегированная; 3 — повышеннолегированная; 4 — высоколегированная.

Вторая цифра марки характеризует сталь в отношении ее электромагнитных свойств. Этой условной цифрой гарантируются удельные потери при перемагничивании (при частоте 50 *гц*), а также магнитные индукции в сильных полях. Наличие третьей цифры 0 обозначает, что сталь холоднокатаная (текстурованная). Буква А после цифры обозначает особо низкие удельные потери.

В табл. 2-2 указаны магнитные индукции *B* при соответствующих значениях напряженности поля *H* (последняя указывается индексом при *B*) и удельные потери $p_{10/50}$, $p_{15/50}$, $p_{17/50}$ (здесь числитель индекса указывает максимальное значение индукции — соответственно 10 000, 15 000, 17 000 *гс* при ее синусоидальном изменении во времени, а знаменатель индекса — частоту перемагничивания 50 *гц*).

В табл. 2-2а приведены характерные величины для тонколистовой электротехнической стали, применяемой обычно при частоте перемагничивания 400 *гц* и выше; приведенные здесь удельные потери в стали $p_{7,5/400}$ и $p_{10/400}$ *вт/кг* соответствуют частоте перемагничивания 400 *гц* и максимальным значениям индукции 7 500 и 10 000 *гс* при ее синусоидальном изменении.

Таблица 2-2а

Марка стали	Толщина листа, *мм*	Магнитная индукция, *гс* (не менее), при напряженности поля, *а/см*			Удельные потери, *вт/кг* (не более)		Удельное электросопротивление, *ом·мм²/м* (не менее)
		B_5	B_{10}	B_{25}	$p_{7,5/400}$	$p_{10/400}$	
Э44	0,35	12 100	13 000	14 400	10,7	19	0,57
Э44	0,20	12 000	12 900	14 200	7,2	12,5	0,57
Э44	0,10	11 900	12 800	14 000	6	10,5	0,57
Э340	0,20	15 000	16 000	17 000	7	12	0,47

Следует иметь в виду, что холоднокатаные стали являются магнитно-анизотропными, т. е. обладают высокой проницаемостью и низкими потерями при намагничивании вдоль листа (в направлении прокатки) и худшими свойствами при намагничивании во всяком другом направлении.

Листы электротехнической стали согласно ГОСТ 802-58 имеют размеры, указанные в табл. 2-3.

Из указанных марок стали для якорей нормальных (серийных) машин постоянного тока, асинхронных и синхронных машин в настоящее время применяются марки Э11, Э12, Э21. При мощности, примерно большей 100 *квт*, в новых сериях предусматривается применение марок Э22 и Э31. Для мощных гидрогенераторов и турбогенераторов применяется сталь марок Э41 и Э42, а при $P_н >$ > 150 *Мвт* Э330. Другие марки стали могут быть применены для специальных машин или тех частей магнитной системы машины, где могут быть в большой степени использованы улучшенные магнитные свойства стали; например, для главных полюсов машин постоянного тока может оказаться целесообразным применение холоднокатаной стали. Для нормальных машин при 50 *гц* берутся листы толщиной 0,5 *мм*.

Магнитные свойства стали характеризуются кривыми намагничивания, которые находятся опытным путем. При практических расчетах удобнее пользоваться таблицами, которым соответствуют кривые намагничивания. Такие «Таблицы намагничивания», так же как и некоторые кривые намагничивания для ферромагнитных материалов, приведены в приложении II. Они позволяют найти для индукции *B*, *гс* соответствующее значение напряженности поля *H*, *а/см* (в приложении II приводятся средние значения *H* по данным ряда опытов).

Как указывалось, потери мощности в листовой стали от гистерезиса

Таблица 2-3

Марка стали	Размер, *мм*		
	толщина	ширина	длина
Э11, Э12	1,0	750	1500
	1,0	860	1720
	1,0	1000	2000
Э11, Э12, Э13, Э21, Э22	0,50	600	1200
	0,50	670	1340
	0,50	750	1500
	0,50	860	1720
	0,50	1000	2000
Э31, Э32, Э41, Э42 Э43, Э43А	0,50	600	1500
	0,50	750	1500
	0,50	860	1720
	0,50	1000	2000
	0,35	750	1500
	0,35	1000	2000
Э44	0,35	750	1500
	0,20	700	720
	0,40	700	1400
	0,10	700	720
Э310, Э320, Э330	0,50	600	1500
	0,50	750	1500
	0,50	860	1720
	0,50	1000	2000
Э310, Э320, Э330, Э330А	0,35	240	1500
	0,35	750	1500
	0,35	1000	2000
Э340	0,20	240	1500
	0,20	750	1500

Примечания: 1. По требованию заказчика поставляются листы марок: Э11, Э12, Э13, Э21 и Э22 размерами 0,50×700×1 400, 0,50×800×1 600 и 0,50×930×1 860 *мм*; Э31 и Э32 размерами 0,50×600×1 200 и 0,50×600×1 800 *мм*; Э41, Э42, Э43, Э43А, Э310, Э320 и Э330 размерами 0,50×600×1 200 *мм*; Э44 размерами 0,20×750×850 и 0,20×750×1 500 *мм*.

2. По требованию заказчика поставляются отдельными партиями листы толщиной 0,42 и 0,30 *мм* и длиной и шириной в соответствии с указанными в табл. 2-3.

3. С согласия заказчика допускается поставка листов, уменьшенных против указанных в табл. 2-3 размеров по длине и ширине.

и вихревых токов характеризуются удельными потерями, т. е. потерями в 1 *кг* при частоте 50 *гц* и синусоидальном изменении индукции во времени, которые согласно ГОСТ 802-58 не должны превышать некоторых определенных пределов (см. табл. 2-2).

Значения удельных потерь определяют опытным путем при помощи особых аппаратов и приборов.

При частоте перемагничивания f, отличающейся от частоты 50 *гц* (в пределах 10—100 *гц*), удельные потери можно определить по формуле

$$p_f \approx p_{50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}. \qquad (2\text{-}1)$$

Для уменьшения потерь от вихревых токов листы стали изолируются один от другого специальным лаком или бумагой[1].

Уменьшение активного сечения пакета, собранного из листов, вследствие изоляционных прослоек между ними учитывается при помощи *коэффициента заполнения пакета сталью* k_c, равного отношению сечения чистой стали (без изоляции) ко всему сечению пакета. Значения коэффициента k_c в зависимости от рода изоляции и толщины стальных листов приведены в табл. 2-4.

Таблица 2-4

Коэффициент заполнения пакета сталью k_c

Толщина листа, *мм*	Изоляция листов		
	неизолированные, оксидированные	лак	бумага
1	0,98	0,97	0,95
0,5	0,95	0,93	0,90
0,35	0,93	0,91	0,87
0,25	0,91	0,88	0,84
0,15	0,86	0,81	0,75

В таблице указаны средние значения k_c, так как последний зависит также от степени прессовки листов и равномерности их толщины.

Для асинхронных машин при длине пакета статора, не превышающей примерно 14—15 *см*, листы часто не покрывают изолирующим лаком, так как в этом случае имеющаяся на поверхности их естественная окалина является достаточной изоляцией; здесь можно принять $k_c = 0{,}95$.

Роторы с беличьей клеткой, полученной путем заливки пазов расплавленным алюминием, собирают из неизолированных листов, при этом также $k_c = 0{,}95$.

В обычных случаях для главных полюсов машин постоянного тока применяется листовая сталь Э11 толщиной 0,5 или 1,0 *мм*, для полюсов синхронных машин — листовая сталь толщиной 1—2 *мм* и больше; здесь $k_c = 0{,}95 \div 0{,}98$.

Значения H в зависимости от B для стальных листов толщиной 1—

[1] Бумагу для изоляции между листами в настоящее время применяют крайне редко.

2 *мм* можно брать из табл. II-6 приложения II.

2. **Стальное литье** применяется для станин машин постоянного тока и ободов (ярм) роторов синхронных машин.

Магнитные характеристики литой стали колеблются в очень широких пределах в зависимсости от ее химического состава. В приложении II дана таблица намагничивания (табл. II-5) простой углеродистой стали, наиболее часто применяемой для станин машин постоянного тока.

3. **Листовая сталь** применяется для сварных станин машин постоянного тока и роторов синхронных машин. Толщина ее колеблется от 1,5 до 120 *мм*. По магнитным свойствам этот материал приближается к литой стали (табл. II-5).

4. **Кованые стали** или **стальные поковки** находят применение для добавочных полюсов машин постоянного тока, роторов быстроходных синхронных машин. Для них можно пользоваться той же таблицей намагничивания (табл. II-5).

В случае поковок для роторов турбогенераторов, выполняемых из специальной стали, можно пользоваться табл. II-8 или II-9.

5. **Чугун** применяется для частей магнитной системы редко вследствие его плохих магнитных свойств. Ранее из чугуна выполняли станины машин постоянного тока. В настоящее время для них применяют литую или листовую сталь.

Из чугуна иногда делают ободы роторов тихоходных явнополюсных синхронных машин, когда необходимо иметь повышенный маховой момент GD^2 (например, у синхронного двигателя для поршневого компрессора) и когда механические напряжения допускают применение чугуна.

Таблица намагничивания серого чугуна, применяемого в электромашиностроении, приведена в приложении II (табл. II-7).

2-2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К проводниковым материалам, применяемым для электрических машин, должна быть отнесена прежде всего медь — сравнительно недорогой металл, имеющий малое удельное сопротивление.

Наибольшей электропроводностью из всех металлов обладает серебро. Медь занимает второе место. Ее удельное сопротивление только на 4—4,2% больше, чем у серебра, которое не может быть применено из-за своей высокой стоимости.

Большое влияние на сопротивление меди оказывают различные примеси. Поэтому для проводников применяется возможно более чистая электролитическая медь. Она не должна содержать более 0,1% примесей. Особенно вредны примеси сурьмы и висмута.

При холодной прокатке медь подвергается наклепу, что делает ее более твердой и увеличивает ее удельное сопротивление. Отжиг восстанавливает основные свойства меди и его следует применять не только на кабельных, но и на электромашиностроительных заводах, если неизолированные медные проводники в процессе изготовления обмотки подвергались наклепу (например, однослойные обмотки возбуждения синхронных машин).

Наряду с медью для проводников применяют также алюминий и некоторые сплавы (латунь, бронза). Алюминий находит применение главным образом для беличьих клеток короткозамкнутых асинхронных двигателей, латунь и бронза — для верхних стержней двойных клеток короткозамкнутых двигателей и пусковых клеток синхронных двигателей.

Основные физические свойства проводниковых материалов — меди и алюминия — указаны в табл. 2-5.

Удельные сопротивления меди и алюминия при практических расчетах сопротивлений обмоток машин берут несколько бóльшими, чем указанные в табл. 2-5 (см. табл. 7-1).

Коллекторы машин постоянного тока делаются из твердотянутой меди, причем в последние годы для повышения механической прочности коллектора применяется медь с присадкой кадмия. Такая кадмиевая медь находит себе применение для коллекторов быстроходных машин постоянного тока.

Таблица 2-5

Материал	Сорт	Удельный вес, $г/см^3$	Удельное сопротивление при 20 °С, $ом \cdot мм^2/м$	Температурный коэффициент сопротивления при ϑ°С, 1/°С	Коэффициент линейного расширения, 1/°С	Удельная теплоемкость, $вт \cdot сек/кг \cdot град$	Удельная теплопроводность $вт/см \cdot град$
Медь	Электролитическая отожженная	8,9	$(17{,}24 \div 17{,}54) \times 10^{-3}$	$\frac{1}{235+\vartheta}$	$1{,}68 \cdot 10^{-5}$	390	3,75
Алюминий	Рафинированный	2,6—2,7	$28{,}2 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{245+\vartheta}$	$2{,}31 \cdot 10^{-5}$	816	2,03

Контактные кольца асинхронных двигателей делают в последние годы обычно из меди с целью уменьшения электрических потерь в переходных скользящих контактах, но иногда их делают также с целью экономии цветных металлов и повышения механической прочности из стали. Стальные кольца часто применяются для быстроходных синхронных машин.

Упомянем здесь также материалы, из которых выполняют щетки для электрических машин: нефтяной кокс; антрацит; натуральный и искусственный графиты; медный, цинковый, оловянный и свинцовый порошки; связующие (смола, бакелит) и др.

2-3. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Изоляцию обмоток электрической машины следует рассматривать как одну из основных частей ее конструкции. От нее зависят технико-экономические характеристики машины. Она прежде всего должна обеспечить надежную работу машины в различных условиях ее эксплуатации.

Размеры изоляции — толщина междувитковой и пазовой изоляции — существенно влияют на габариты и весовые показатели электрических машин. Нагревостойкость изоляционных материалов, примененных для изоляции обмоток, определяет допустимые для них перегревы, а следовательно, и электромагнитные нагрузки машин. Большое значение имеют теплопроводность изоляции, ее влагостойкость и химическая стойкость. Кроме того, изоляция должна обладать достаточной механической прочностью, так как в процессе изолирования обмоток, укладки их в машины, а также в условиях эксплуатации изоляция подвергается значительным механическим воздействиям.

При проектировании электрических машин большое внимание должно быть уделено правильному выбору электроизолирующих материалов и конструктивному оформлению изоляционных деталей.

При выборе изоляции надлежит руководствоваться следующими общими указаниями:

1. Изоляция всех элементов машины должна обладать высокой надежностью.

2. Электроизолирующие материалы, толщина изоляции и ее выполнение должны выбираться с учетом условий эксплуатации машины (влажность, воздействие температуры, механических усилий, вредных газов и пр.).

3. Срок службы изоляции в нормальных условиях работы машины должен быть не менее 15—20 лет.

4. Должны применяться высококачественные материалы, позволяющие получить высокие коэффициенты заполнения активных зон машин при высокой надежности изоляции.

5. Должны учитываться вопросы технологии при разработке конструкции изоляции.

6. Необходимо также не упускать из виду вопросы экономики (стоимость изоляционных материалов, их дефицитность, трудоемкость технологических процессов, расходы тепла, электрической энергии и т. п.).

Срок службы электрической машины при нормальных условиях ее эксплуатации определяется главным образом сроком службы ее изоляции. Для него решающее значение имеет температурный режим, так как при нагреве в изоляции происходят необратимые физико-химиче-

ские процессы, приводящие к ее старению, т. е. к постепенной утрате механической прочности и изолирующих свойств. Поэтому в основу классификации изоляции электрических машин положена ее нагревостойкость — способность сохранять свои характеристики на определенном уровне при установленной для данного класса изоляции температуре.

При выборе изоляционных материалов для изоляции электрических машин следует руководствоваться ГОСТ 8865-58 «Материалы электроизоляционные для электрических машин, трансформаторов и аппаратов. Классификация по нагревостойкости». Согласно этому ГОСТ электроизоляционные материалы разделяются по нагревостойкости на семь классов с предельно допустимыми для них температурами, указанными в табл. 2-6.

Таблица 2-6

Обозначение класса изоляции по нагревостойкости	У	А	Е	В	F	Н	С
Температура, характеризующая нагревостойкость данного класса, °С	90	105	120	130	155	180	Более 180

Температуры, указанные в таблице, установлены как предельно допустимые для изоляционных материалов при их использовании в электрических машинах общего применения, длительно (в течение ряда лет) работающих в нормальных условиях эксплуатации. При указанных температурах обеспечиваются технико-экономически целесообразные сроки службы этих машин. Температуры в наиболее нагретом месте их изоляции не должны превышать указанных в таблице.

В условиях работы электрических машин нагрев отдельных частей их распределяется неравномерно, и практически не представляется возможным точно измерить температуру наиболее нагретого места. Поэтому в основном стандарте на электрические машины общего применения устанавливаются допустимые для отдельных классов изоляции температуры в зависимости от способа их измерения. В соответствии с этим устанавливаются допустимые температуры (и превышения температуры над принятой стандартной температурой охлаждающей среды), которые следует принимать при тепловом расчете электрических машин (см. гл. 11).

Для машин, предназначенных для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы (например, тяговые и краново-металлургические двигатели), турбогенераторов и гидрогенераторов, а также для других специальных машин допустимые превышения температуры установлены особыми ГОСТ.

Выбору изоляционных материалов для отдельных частей электрической машины должно быть уделено большое внимание. Поэтому необходимо знать их свойства. Далее приводятся общие сведения об изоляционных материалах, относящихся к различным классам нагревостойкости.

К классу изоляции Y относятся волокнистые материалы из целлюлозы, шелка, полиамидов; целлюлозные бумаги, картон и фибра; древесина; пластмассы с органическим наполнителем и др. Указанные материалы для современных электрических машин не применяются, так как они обладают большой гигроскопичностью и поэтому не обеспечивают надлежащей надежности изоляции.

К классу изоляции А относятся материалы класса Y, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик. Пропиточные составы обычно имеют в своей основе природные смолы и масла. Для пропитки могут быть применены лаки смоляные (бакелитовые, шеллачные, копаловые), масляные, масляно-смоляные и масляно-битумные, эфироцеллюлозные термопластичные компаунды (би-

тумные и др.), не вытекающие при предельно допустимых температурах (только для неподвижных обмоток); нефтяные и синтетические жидкие диэлектрики. К классу А относятся также ацетобутират; целлюлозные и триацетатцеллюлозные пленки; пленкоэлектрокартон на основе триацетатцеллюлозной и лавсановой пленок; лакобумаги; лакоткани хлопчатобумажные и шелковые; некоторые синтетические лаки.

К классу изоляции Е относятся пленки и волокна из полиэтилентерефталата (лавсан); термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые); синтетические лаки для изоляции эмальпроводов; слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей.

К классу изоляции В относятся материалы на основе щипаной слюды и слюдинитов, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами: битумно-масляные лаки; натуральные и синтетические смолы, модифицированные и немодифицированные растительными маслами, и лаки на их основе; термореактивные полиэфирные смолы; эпоксидные смолы; термопластичные компаунды (битумные и др.) с температурой размягчения, обеспечивающей отсутствие их вытекания при рабочих температурах (только для неподвижных обмоток)[1]. Сюда же относятся стеклолакоткани и стеклолакочулки с указанными связующими и пропиточными составами, а также асбестовые волокнистые материалы с органическим связующим (шеллак, глифталь-бакелитовые и эпоксидные лаки).

К классу изоляции F относятся материалы на основе щипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой; стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов; стеклолакоткани и стеклолакочулки; связующие и пропитывающие составы — соответствующие данному классу по нагревостойкости смолы и лаки: модифицированные и немодифицированные алкидные, эпоксидные, термореактивные полиэфирные, полиуретановые и кремнийорганические.

К классу изоляции Н относятся те же материалы, что и к классу *F*, но с соответствующими данному классу по нагревостойкости кремнийорганическими лаками и смолами.

К классу изоляции С относятся слюда, стекло и стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц и др.

При указанных для отдельных классов изоляции температурах срок службы изоляции, а следовательно, и срок службы машины составляют примерно 15—20* лет. Если температура обмотки больше допускаемой, то срок службы машины быстро уменьшается. Так, по опытам для изоляции классов А и В при превышении температуры примерно на каждые 10° С сверх 105 и соответственно 130° С срок службы машины уменьшается вдвое, т. е. в общем случае в 2^{α} раза, где для класса А $\alpha = \frac{\theta - 105}{10}$, а для класса В $\alpha = \frac{\theta - 130}{10}$.

Например, для класса А при $\theta = 165°$ С $\alpha = \frac{165 - 105}{10} = 6$ и $2^6 = 64$, т. е. срок службы машины будет составлять только $1/64$ нормального срока. Если машина работает $1/10$ часть времени при температуре обмоток 165° С и $9/10$ времени при температуре их 105° С, то нужно ожидать, что срок службы машины будет составлять $\frac{1}{0,9 + 0,1 \cdot 64} \approx 0,13$ нормального срока.

В применении к электрическим машинам в зависимости от назначения различают следующие виды изоляции:

1) междувитковая, в качестве которой обычно служит изоляционное покрытие обмоточного провода, а при напряжениях $U \geqslant 3\,000$ *в* также синтолента, микалента и пр. (класс изоляции обмотки в основном определяется междувитковой изоляцией);

---

[1] Те же связующие и пропитывающие составы применяются при классе изоляции Е.

* Этот срок подтверждается данными длительной эксплуатации для классов А и В. Что касается других классов изоляции, то для них он, по-видимому, будет больше указанного [Л. 26].

2) секционная (для покрытия секций);

3) изоляция лобовых частей обмоток;

4) междукатушечные и междусекционные прокладки;

5) пазовая (корпусная) изоляция (между изолированными проводниками и стенками паза);

6) изоляция между лобовыми частями обмотки и обмоткодержателями;

7) изоляция между коллекторными пластинами, а также между коллекторными пластинами и сжимающими их деталями;

8) изоляция между полюсами и катушками обмотки возбуждения;

9) изоляция соединений, выводных концов и пр.

При выборе изоляционных материалов для отдельных видов изоляции следует иметь в виду некоторые дополнительные требования, вызванные специальными условиями эксплуатации электрических машин. К ним относятся требования к изоляции в отношении влагостойкости, тропикостойкости, химостойкости, морозостойкости, короностойкости и пр.

Под *влагостойкостью* понимается способность изоляции сохранять свои свойства при нахождении в атмосфере, близкой к состоянию насыщения водяным паром (около 98% относительной влажности воздуха при 20° С). Пропитанные целлюлозные материалы (класс А) не могут считаться достаточно влагостойкими. Поэтому указанные материалы без сочетания с более нагревостойкими и влагостойкими могут применяться только в машинах с изоляцией класса А невлагостойкого исполнения.

Тропикостойкость изоляции (для машин, работающих в условиях тропического климата) в основном обеспечивается высокой влагостойкостью при повышенной температуре окружающей среды и высокой грибостойкостью (на изоляционных материалах могут развиваться плесневые грибы, создающие проводимость поверхностных слоев изоляции и разрушающие ее). Применение материалов на основе целлюлозы для тропических условий недопустимо. Здесь необходимы другие материалы (например, на основе стекла) и специальные пропиточные и покровные лаки.

Химостойкость (для машин, работающих в химически активных средах) — способность изоляции к надежной эксплуатации при доступе к ней химически агрессивных сред (например, паров кислот и щелочей). Здесь также требуются специальные пропиточные и покровные лаки.

Морозостойкость — способность изоляции выдерживать действие низкой температуры.

Короностойкость — способность изоляционных материалов длительно работать в электрических полях с высокой напряженностью (для обмоток высокого напряжения). Наряду с выбором короностойких изоляционных материалов необходимо принимать специальные меры для уменьшения коронирования обмоток (при $U>6{,}3$ *кв*).

Приведем дополнительные сведения об изоляционных материалах, применяемых в электрических машинах.

Слюда — один из наиболее важных изоляционных материалов. Применяются слюды мусковит и флогопит. Мусковит применяется в тех случаях, когда электрическая изоляция подвергается действию высоких напряженностей поля (для машин высокого напряжения). Мусковит химически более стоек и механически более прочен, чем флогопит. Однако флогопит более гибок, поэтому в ряде случаев материалы на основе флогопита оказываются более технологичными (формовочный миканит на флогопите для конусов, микалента для витковой изоляции и др.).

В зависимости от сочетания слюды (щипаной, в виде отдельных пластинок) с подложками и клеящими лаками получаются материалы различного назначения и различных классов нагревостойкости от В до С. К ним относятся миканиты, микафолии, микаленты. **Миканиты** — листы из склеенных пластинок слюды. Если для склеивания при-

меняются лаки, длительно сохраняющие эластичность, то получаются **гибкие миканиты.** Они изготовляются без подложек и с подложками — бумажными и стеклянными; применяются как пазовая изоляция для полузакрытых и полуоткрытых пазов.

Формовочные миканиты изготовляются на лаках и смолах, размягчающихся при нагреве и переходящих в твердое состояние в процессе дальнейшего нагревания и опрессовывания. Они применяются для изготовления коллекторных манжет (конусов), различного рода втулок, цилиндров, реек и т. п.

Прокладочный миканит — твердый спрессованный материал, обычно применяемый для изготовления прокладок в электрических машинах.

Коллекторный миканит — твердый, спрессованный под большим давлением материал с малым содержанием связующих (до 4%) и малой усадкой при нагреве; применяется для изоляции между коллекторными пластинами.

Микафолий — более тонкие листы с подложками бумажными или стеклянными. В последнем случае получается **стекломикафолий.** Здесь используются те же лаки и смолы, что и для формовочного миканита. Микафолий применяется для получения твердой изоляции (гильзовой для стержней, например, обмоток фазного ротора асинхронных машин, компенсационных обмоток крупных машин постоянного тока).

Микаленты и стекломикаленты — особо гибкие в холодном состоянии слюдяные материалы с подложками с одной стороны или с обеих сторон из микалентной бумаги или стеклянной ткани. Основная область применения микаленты — обмотки высокого напряжения. Для микаленты, применяемой в качестве корпусной (пазовой) изоляции таких обмоток, следует брать только слюду мусковит. Микаленту из слюды флогопит как более эластичную применяют обычно для витковой изоляции. Для изолирования обмоток низкого напряжения химостойкого и тропического исполнений, а также для обмоток с нагревостойкостью классов F и H нормального и усиленновлагостойкого исполнений применяются стекломикаленты.

В последние годы разработаны материалы — заменители слюды: **слюдиниты и слюдопласты,** которые все более широко применяются для изоляции электрических машин.

Основой **слюдинитовых материалов** служат слюдинитовые бумаги, получаемые из отходов слюды мусковит при равномерном ее нагревании до 700—800° С с последующей химической обработкой. Созданная таким образом суспензия слюдяных чешуек на специальном устройстве разливается в непрерывное полотно и просушивается. В результате получается слюдинитовая бумага. В процессе отлива слюдинитовый слой может быть нанесен на подложки из целлюлозных или стеклянных волокон или на стеклоткань.

Из слюдинитовых бумаг при помощи связующих изготовляется широкий ассортимент слюдинитовых материалов, аналогичных слюдяным: гибкие слюдинит и стеклослюдинит; формовочный слюдинит; коллекторный слюдинит; слюдинитофолий и стеклослюдинитофолий; слюдинитовые и стеклослюдинитовые ленты.

Слюдинитовые материалы по сравнению со слюдяными имеют преимущества: бóльшую равномерность по толщине и электрической прочности, позволяют получить меньшую толщину материала. Однако они не всегда могут считаться равноценными заменителями слюдяных материалов, так как менее прочны механически и менее влагостойки.

Слюдопластовые материалы изготовляются из слюдопластовых листов, полученных путем расщепления слюды и многократного прокатывания чешуек между валками. При этом получаются более крупные чешуйки слюды, чем в слюдините. В процессе формирования слюдопластового листа чешуйки самосрастаются. Но так как при сушке слюдопласта, состоящего из пластинок малой площади, вода интенсивно испаряется, оставляя воздушные

включения, электрическая прочность *слюдопласта ниже*, чем слюды.

Слюдопластовые материалы изготовляются в том же ассортименте, что и слюдинитовые. Те и другие материалы в ряде случаев уже применяются взамен более дорогих и дефицитных слюдяных материалов. Однако необходимы дальнейшие экспериментальные работы по более широкому их применению. Имеющийся опыт подтверждает большую перспективность этих материалов.

В предыдущем рассматривались материалы, которые применяются главным образом в качестве изоляции обмоток высокого напряжения при их нагреве до 130° С. В машинах с нагревом до 105° С в качестве основной изоляции широко применяются **лакоткани**, а в последнее время и **стеклолакоткани**. Они представляют собой лакированные различными лаками ткани на основе хлопчатобумажных, шелковых, капроновых или стеклянных волокон.

Хлопчатобумажные и шелковые лакоткани всех марок относятся к классу нагревостойкости А и не должны применяться в машинах влагостойкого, тропического и химостойкого исполнений. Они находят широкое применение в качестве основной изоляции паза, изоляции лобовых частей обмоток, внутримашинных соединений, главным образом машин нормального исполнения.

В последнее время разработаны стеклолакоткани более высокой нагревостойкости (до класса F включительно) с применением соответствующих лаков.

В машинах с нагревом до 120° С для пазовой изоляции применяются также **полиэтилентерефталатные пленки**, обладающие высокими электроизоляционными характеристиками и большой механической прочностью. Их применение позволяет резко сократить толщину пазовой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза. Они обычно применяются в сочетании с электрокартоном марки ЭВТ.

В машинах малой мощности (до 0,2—0,3 *квт*) можно применять одну полиэтилентерефталатную пленку толщиной 0,10—0,15 *мм*, в статорах до 7 *квт* — пленку толщиной 0,05 *мм* с одним слоем электрокартона толщиной 0,2 *мм*. В более мощных машинах следует применять для пазовой изоляции пленку, один слой электрокартона (к стали) и один слой стеклолакоткани (к обмотке) или два слоя пленкоэлектрокартона.

Для защиты основных изоляционных материалов от механических воздействий в процессе изготовления машины и во время ее эксплуатации применяется ряд вспомогательных материалов. Из них наиболее часто применяется целлюлозный электрокартон марки ЭВ (пропитанный обычно в льняном масле).

Пропитанный электрокартон относится к классу нагревостойкости А. Однако в качестве подложек он может применяться и в машинах с изоляцией классов Е и В. Его нельзя применять в машинах тропического и химостойкого исполнения.

Близок по технологическим свойствам к электрокартону **электронит**, представляющий собой гибкий листовой материал, состоящий из асбестового волокна (70%) и синтетического каучука (30%).

Электронит может быть применен в качестве вспомогательной изоляции в машинах с изоляцией классов В и F и в машинах химостойкого исполнения. Особенно эффективно его применение для концевых листов (шайб) сердечников статоров, роторов и якорей, так как он хорошо штампуется и дает незначительную усадку в процессе старения.

Для механической защиты и закрепления изоляции применяются хлопчатобумажные (миткалевые, тафтяные, киперные) и стеклянные ленты. Хлопчатобумажные ленты применяются только в машинах с изоляцией класса А нормального исполнения и требуют обязательной пропитки, стеклянные — в машинах с изоляцией классов Е, В, F и Н всех исполнений.

Применяются также **твердые изоляционные материалы**. Для клиньев, дистанционных прокладок машин с изоляцией класса А применяется твердая древесина (бук, береза), пропитанная льняным маслом.

Для клиньев, досок с зажимами и дистанционных прокладок в машинах с изоляцией классов Е, В, F и Н применяются слоистые пластики или пластические массы. Из них текстолит рекомендуется применять при изоляции класса Е, стеклотекстолиты соответствующих составов — при изоляции классов В, F и Н.

Следует здесь также упомянуть асбобакелит, применяемый наряду с текстолитом для рамок обмоток возбуждения; асботекстолит, применяемый для расклиновки обмоток ротора турбогенераторов (для клиньев того же ротора применяется обычно дюралюминий).

Большое значение в создании надежной изоляции — электрически и механически прочной, влаго-химо- и тропикостойкой — имеют пропиточные и покровные лаки и эмали, а также компаунды — пропитывающие и обмазочные (пасты). Они повышают теплопроводность и нагревостойкость изоляции.

Многие из перечисленных изоляционных материалов обозначены определенными марками; на них установлены ГОСТ.

В последнее время начинают приобретать значение **стекловолокнистые бандажные ленты.** Они применяются для укрепления обмоток роторов и якорей вместо проволочных бандажей. Для их изготовления берется нетканая стеклянная лента, волокна которой идут только в продольном направлении. В качестве связующих применяются термореактивные лаки, обладающие высокой цементирующей способностью. После наложения ленты с натягом, превышающим усилие от центробежных сил, полученный стекловолокнистый бандаж подвергается специальной термической обработке.

В зависимости от состава связующих (пропиточных лаков) стекловолокнистые бандажные ленты могут применяться при классах изоляции от А до F. Они имеют высокую электрическую прочность (до 16 *кв/мм*) и весьма большое омическое сопротивление, которые сохраняются и после увлажнения. Механическая прочность их также велика (порядка 80—90 *кГ/мм*²).

2-4. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Обмоточные провода — медные и алюминиевые — изготовляют круглых и прямоугольных сечений с различными видами изоляции в соответствии с действующими ГОСТ и ВТУ (ведомственными техническими условиями). Обычно для изолированных проводов применяется волокнистая, эмальволокнистая или эмалевая изоляция.

Класс нагревостойкости изоляции проводов зависит от природы волокнистого материала или химического состава эмали.

Провода с пропитанной волокнистой и эмальволокнистой изоляцией, содержащей целлюлозу или синтетические волокна, относятся к классу нагревостойкости А.

Провода со стекловолокнистой изоляцией марки ПСД с изоляцией нормальной толщины (0,23—0,33 *мм*) и марки ПСДТ с более тонкой изоляцией (толщина 0,18—0,23 *мм*) относятся к классу нагревостойкости Е, В и F. Они широко применяются в машинах тропического и химостойкого исполнений.

В машинах с нагревостойкостью класса Н применяются провода марок ПСДК и ПСДКТ со стекловолокнистой изоляцией, подклеенной кремнийорганическим лаком. Они имеют ту же толщину изоляции, что и ПСД и ПСДТ, и обладают высокой влагостойкостью.

В последние годы большое значение приобретают провода с эмалевой изоляцией. В новых сериях машин малой и средней мощности общепромышленного применения (при $P_н$ до 200—250 *квт* и $U_н$ до 690 *в*) они применяются во многих случаях взамен проводов с волокнистой изоляцией.

Основное преимущество проводов с высокопрочной эмалевой изоляцией — меньшая толщина изоляционного покрытия (примерно в 1,5 раза, чем у проводов марки ПЭЛШО, в 2 раза, чем у проводов марок ПЭЛБО и ПСДТ, и в 3 раза, чем у проводов марок ПБД и ПСД). При этом повышается теплопроводность изоляции, что позволяет несколько повысить использование об-

Таблица 2-7

Марки основных типов обмоточных проводов, краткая характеристика, класс нагревостойкости и размеры

Марка провода	Характеристика провода	Класс нагревостойкости	Размеры, *мм*
ПБО	Провод медный, изолированный одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	A	∅ 0,2—2,1 (круглые); (0,9—5,5)×(2,1—14,5) (прямоугольные)
ПБД	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи		∅ 0,2—5,2 (круглые); (0,9—5,5)×(2,1—14,5) (прямоугольные)
АПБД	Провод алюминиевый	A	∅ 1,35—8,00 (круглые); (1,81—7,00)×(4,1—18,0) (прямоугольные)
ПЭЛБО	Провод медный, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	A	∅ 0,2—2,1 (круглые)
ПЭЛШО	То же из натурального шелка	A	∅ 0,05—2,1 (круглые)
ПЭЛШКО	То же из шелка капрон	A	∅ 0,05—2,1 (круглые)
ПСД	Провод медный, изолированный двумя слоями обмотки из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком	До F	∅ 0,31—5,2 (круглые); (0,9—5,5)×(2,1—12,5) (прямоугольные)
ПСДТ	То же, но с более тонкой изоляцией	До F	∅ 0,31—2,1 (круглые)
ПСДК	То же, что и ПСД, но с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	До H	∅ 0,31—5,2 (круглые); (0,9—5,5)× (2,1—12,5) (прямоугольные)
ПСДКТ	То же, но с более тонкой изоляцией	До H	(круглые; изготовляются также прямоугольные)
ПДА	Провод медный, изолированный одним слоем асбестового волокна, подклеенного к меди и пропитанного нагревостойким лаком	До F	∅ 1—4,8 (круглые); (1,16—5,1) × (2,1—7,4) (прямоугольные)
ПЭЛ	Провод медный, эмалированный, лакостойкий	A	∅ 0,02—2,44 (круглые)
ПЭВ	Провод медный, эмалированный с высокопрочной поливинилацеталевой (винифлексовой) изоляцией	A	∅ 0,02—0,05 (круглые)
ПЭВ-1	То же	A	∅ 0,02—2,44 (круглые)
ПЭВ-2	То же, но с утолщенным слоем эмали	A	∅ 0,02—2,44 (круглые)
ПЭВП	То же прямоугольный	A	(0,83—3,8) × (2,1—8,8) (прямоугольные)
ПЭМ-1	Провод медный, эмалированный с высокопрочной металвиновой изоляцией	A	∅ 0,06—2,44 (круглые)
ПЭМ-2	То же, но с утолщенным слоем эмали	A	∅ 0,06—2,44 (круглые)
ПЭМП	То же с металвиновой изоляцией прямоугольный	A	(0,83—3,8) × (2,1—8,8) (прямоугольные)
ПЭВПИ	Провод медный, эмалированный полиамидно-изоцианатным лаком	A	∅ 0,06—2,44 (круглые)
ПЭВППИ	То же прямоугольный	A	(0,83—3,8)× (2,1—8,8) (прямоугольные)
ПЭТВ	Провод медный, эмалированный полиэтилентерефталатными лаками	До B	∅ 0,06—2,44 (круглые)
ПЭТВП	То же прямоугольный	До B	(0,83—3,8) × (2,1—8,8) (прямоугольные)
ПЭА	Провод алюминиевый, эмалированный, лакостойкий	A	∅ 0,09—0,55 (круглые)
ПЭВА-1	Провод алюминиевый, эмалированный (винифлекс)	A	∅ 0,57—2,44 (круглые)
ПЭВА-2	То же, но с утолщенной изоляцией	A	∅ 0,57—2,44 (круглые)
ПЭВА-1	Провод алюминиевый, эмалированный (винифлекс)	A	∅ 0,57—2,44 (круглые)
ПЭВА-2	То же, но с утолщенной изоляцией	A	∅ 0,57—2,44 (круглые)

Марка провода	Характеристика провода	Класс нагрево-стойкости	Размеры, *мм*
ППТБО	Провод медный, изолированный двумя слоями пластифицированной триацетатцеллюлозной пленки, одним слоем телефонной бумаги и одним слоем хлопчатобумажной пряжи (применяется для нормальных машин на 3000 и 6000 *в* без дополнительной витковой изоляции)	А	(0,9—5,5) × (2,1—14,5) (прямоугольные)
ППЛБО	То же, изолированный лавсановой пленкой и хлопчатобумажной пряжей (в настоящее время применяется взамен ППТБО, как более надежный)	А	(0,9—5,5) × (2,1—14,5) (прямоугольные)

мотки. Кроме того, скользкая гладкая поверхность эмалированных проводов облегчает укладку их в пазы.

Характеристики изолированных проводов различных марок, их размеры и класс нагревостойкости приведены в табл. 2-7.

Стандартные размеры проводов и более подробные сведения о толщинах их изоляции приведены в приложении IV, где также указываются размеры полосовой прямоугольной меди, применяемой для последовательных обмоток возбуждения машин постоянного тока и однослойных обмоток возбуждения синхронных машин.

Рекомендации по применению обмоточных проводов даются в гл. 3, 4, 5, 12, 13 и 14.

Приведенные в табл. 2-7 марки обмоточных проводов относятся к основным их типам, наиболее часто применяемым для обмоток современных электрических машин.

Исследовательские работы по изысканию новых изоляционных покрытий проводов, особенно эмалированных, непрерывно продолжаются, и можно ожидать, что в ближайшие годы мы будем иметь еще более надежные изолированные провода с лучшими свойствами.

В настоящее время эмалированные провода применяются главным образом в машинах малой и средней мощности — для статорных обмоток асинхронных и синхронных машин и полюсных катушек машин постоянного тока.

К недостаткам всех проводов с эмалевой изоляцией относится их термопластичность — размягчение эмалевой пленки при повышенной температуре (около 170° С), поэтому не следует применять их для вращающихся обмоток машин малой мощности со скоростью вращения свыше 5 000—6 000 *об/мин*, а также для вращающихся обмоток машин мощностью свыше 10—15 *квт*.

2-5. ЩЕТКИ

Выбору щеток для электрических машин, особенно коллекторных, всегда следует уделять большое внимание. От правильного выбора щеток во многом зависит надежность работы электрических машин.

Щетки, применяемые для электрических машин, согласно ГОСТ 2332-63 «Щетки для электрических машин» разделяются на четыре группы: угольно-графитные (Т), графитные (Г), электрографитированные (ЭГ), медно-графитные (М, МГ, МГС). В зависимости от состава щеток и способов их изготовления они имеют различные характеристики.

Выбор щеток для машин должен производиться на основе опытных данных, получаемых в специальных лабораториях, с учетом различных условий эксплуатации машин.

При выборе щеток можно руководствоваться указаниями табл. 2-8. Стандартные размеры щеток (ГОСТ 12232-66) приведены в приложении V.

Таблица 2-8

Рекомендации по выбору щеток, расчетных параметров и условий работы

Марки щеток	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, *в*	Плотность тока, *а/см²*	Окружная скорость, *м/сек*	Удельное нажатие, *Г/см²*	Область применения
Т2, Т6	2,0	6	10	200—250	Для больших машин (свыше 200 *квт*) при напряжении до 1000 *в* и спокойной нагрузке (средние условия коммутации)
Г1	2,2	7	12	200—250	Для малых машин (до 10 *квт*) при напряжении до 500 *в* и спокойной нагрузке (облегченные условия коммутации)
Г3	1,9	10—11	25		
611М	2,0	10—12	40		
ЭГ2а	2,6	10	45	200—250	Для средних (10—200 *квт*) и больших (свыше 200 *квт*) машин при напряжении до 1000 *в* (средние и затрудненные условия коммутации) и для контактных колец
ЭГ4	2,0	12	40	150—200	
ЭГ8	2,4	10	40	200—400	
ЭГ14	2,5	10—11	40	200—400	
ЭГ71	2,2	10—12	40	200—250	
ЭГ74	2,7	10—15	50	175—250	
М1	1,5	15	25	150—200	Для низковольтных генераторов (до 48 *в*) и контактных колец
М3	1,8	12	20		
М6	1,5	15	25		
М20	1,4	12	20		
МГ	0,2				
МГ2	0,5	20	20	180—230	
МГ4	1,1	15	20	200—250	
МГ64	0,5	20—25	25	150—200	
МГС5	2,0	15	35	200—250	

Примечание. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток (в случае контактных колец — приблизительно 0,15—0,17).

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

3-1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Современные якорные обмотки машин постоянного тока выполняются барабанными. В отличие от кольцевых такие обмотки укладываются в пазы на внешней цилиндрической поверхности сердечника якоря, что упрощает технологию их изготовления, повышает использование обмоточного провода и делает обмотку более надежной.

Два проводника обмотки, заложенные в пазы якоря, отстоящие один от другого примерно на полюсное деление и соединенные между собой, образуют *виток*. Часть обмотки, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков, составляет якорную *секцию* (рис. 3-1).

По виду соединения секций якорные обмотки делятся на *петлевые*, *волновые* и *комбинированные* (*лягушечьи*).

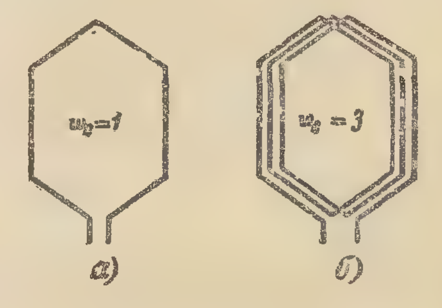


Рис. 3-1. Якорная секция.
а — одновитковая; *б* — трехвитковая.

На рис. 3-2 показаны виды обмоток. В петлевой обмотке секции при их последовательном соединении образуют форму петель, в волновой — форму волн; комбинированная обмотка состоит из петлевой и волновой обмоток, присоединенных к общему коллектору. По форме уложенных совместно секций петлевой и волновой обмоток комбинированную обмотку называют *лягушечьей* (рис. 3-2, *в*).

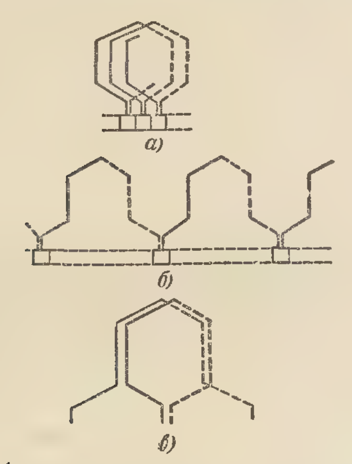


Рис. 3-2. Виды якорных обмоток.

а — петлевая; *б* — волновая; *в* — комбинированная (лягушечья).

Каждой секции якорной обмотки соответствует одна коллекторная пластина. Поэтому число коллекторных пластин равно числу секций:

$$K = S, \qquad (3\text{-}1)$$

где K — число коллекторных пластин;
S — число секций.

Стороны секций укладываются в пазы сердечника якоря обычно в два *слоя*[1].

На рис. 3-3 схематически показаны разрезы пазов с уложенными в них проводниками (сторонами) секций. При многовитковых секциях стороны секций, условно изображенные на рис. 3-3 прямоугольниками, содержат по $w_с$ проводников, где $w_с$ — число витков в секции. В каждый слой паза укладывается от одного до $u_п$ секционных сторон, где $u_п = 1, 2, 3\ldots$ После общей изолировки $u_п$ секций образуется якорная катушка, показанная на рис. 3-4 (с $u_п = 3$).

При двухслойной укладке проводников в пазы таких катушек будет столько же, сколько пазов или

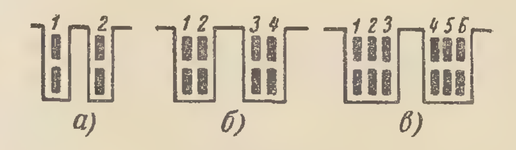


Рис. 3-3. Расположение сторон якорных секций в пазу.

а — $u_п = 1$; *б* — $u_п = 2$; *в* — $u_п = 3$.

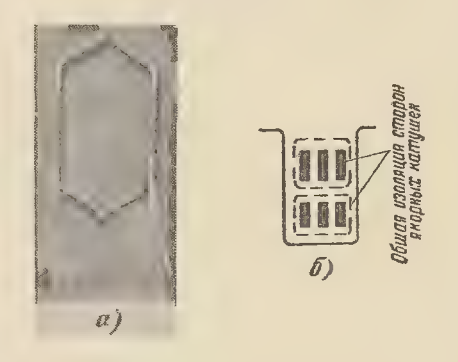


Рис. 3-4. Якорная катушка с тремя секциями.

а — внешний вид катушки; *б* — расположение сторон катушек в пазу.

зубцов на якоре (Z); тогда число $u_п$ секций в катушке, равное числу секционных сторон в одном слое паза, составит:

$$u_п = \frac{S}{Z} = \frac{K}{Z}. \qquad (3\text{-}2)$$

При составлении схемы обмотки определяют ее шаги, позволяющие осуществить должное соединение секций между собой и с коллекторными пластинами. Такое соединение показано на схеме-развертке. Для наглядности изображения и упрощения вычерчивания схемы-развертки условно принимают в секции один виток ($w'_с = 1$), а в якорной катушке одну секцию ($u'_п = 1$). Последнее приводит на схеме-развертке к условному увеличению числа пазов в $u_п$ раз. В каждом пазу такой схемы,

[1] Для комбинированной обмотки число слоев удваивается.

называемом *элементарным пазом,* будут лежать одна над другой две стороны секций. Верхнюю сторону можно изобразить сплошной линией,

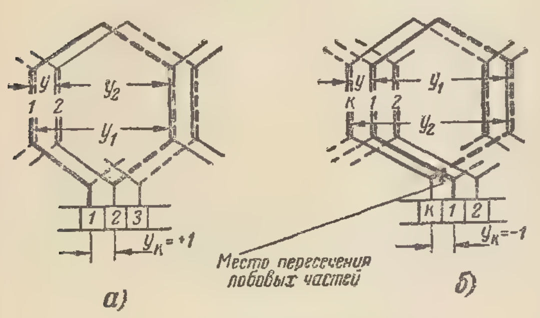


Рис. 3-5. Соединение секций простой петлевой обмотки.

а — не перекрещенная обмотка; *б* — перекрещенная обмотка.

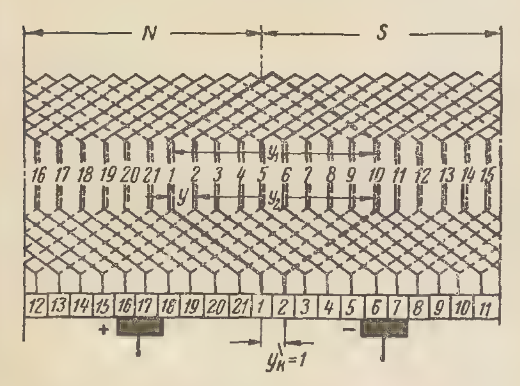


Рис. 3-6. Схема-развертка простой петлевой обмотки.

$K=S=Z=21$; $2p=2a=2$; $y=y_к=1$; $y_1=9$; $y_2=8$.

нижнюю — пунктирной, как это показано на рис. 3-5 и 3-6. Полное число элементарных пазов $Z_э$ согласно (3-2) будет равно числу коллекторных пластин:

$$Z_э = u_п Z = S = K, \qquad (3\text{-}3)$$

где $u_п$ и Z — действительные значения числа секций в якорной катушке и числа реальных пазов обмотки.

Для построения схем-разверток определяют следующие обмоточные шаги (рис. 3-5 и 3-6):

y_1 — *первый частичный шаг,* равный расстоянию между сторонами секции; y_1 определяет, следовательно, ширину секции;

y_2 — *второй частичный шаг,* равный расстоянию между конечной стороной секции при обходе схемы-развертки и начальной стороной последующей секции; положительное или отрицательное значение второго частичного шага определяет последовательность соединений секций, т. е. вид обмотки;

y — результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме-развертке; y — вычисляется как расстояние между начальными сторонами этих секций;

$y_к$ — *шаг по коллектору,* равный расстоянию по окружности коллектора между началами следующих по схеме одна за другой секций.

Шаги секций измеряются числом делений элементарных пазов, шаг по коллектору — числом коллекторных делений. А так как число элементарных пазов и коллекторных пластин одно и то же ($Z_э=K$), то шаги y и $y_к$ выражаются одним и тем же числом делений:

$$y = y_к. \qquad (3\text{-}4)$$

Для получения наибольшего значения э. д. с. ширина секции (или первый частичный шаг) якорной обмотки выбирается равным приблизительно полюсному делению [Л. 3-1]:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon_к = \frac{S}{2p} \mp \varepsilon_к = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon_к = \text{целое число}. \qquad (3\text{-}5)$$

Здесь: $2p$ — число полюсов машины;
$\varepsilon_к$ — укорочение (удлинение) шага; берется минимальным, так чтобы величина y_1 была целым числом.

Для уменьшения длины лобовых соединений секций, а следовательно, и длины витка секции и веса меди обмотки перед $\varepsilon_к$ в (3-5) берут, как правило, знак минус. Тогда:

$$\varepsilon_к = \frac{K}{2p} - y_1. \qquad (3\text{-}5а)$$

Если $\varepsilon_к=0$, то шаг y_1 точно равен полюсному делению; такая обмотка называется *диаметральной* или обмоткой с *диаметральным шагом.* Диаметральная обмотка выполнима при условии

$$\frac{K}{2p} = \text{целое число}. \qquad (3\text{-}6)$$

Для улучшения коммутации машин постоянного тока выбирают первый частичный шаг укороченным (удлиненным), т. е. несколько меньшим (или бо́льшим) полюсного деления. Обмотку с укороченным (удлиненным) шагом называют также хордовой.

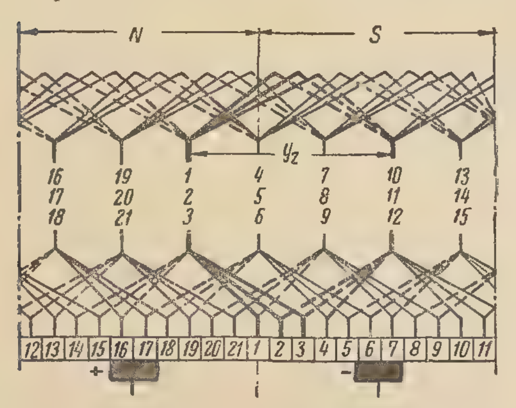


Рис. 3-7. Равносекционная простая петлевая обмотка. На схеме (в середине цифрами от *1* до *21* показаны номера левых (верхних) сторон секций отдельных катушек.

Для укладки обмотки в пазы реального якоря вычисляют зубцовый шаг, определяющий ширину якорной катушки, а следовательно, и ширину секции. Зубцовый шаг, выраженный в реальных зубцовых делениях якоря, в $u_п$ раз меньше первого частичного шага y_1, как это следует из (3-3):

$$y_z = y_1/u_п. \qquad (3\text{-}7)$$

Схему-развертку можно выполнить с изображением реальных пазов. На рис. 3-7 показана схема-развертка в реальных зубцовых делениях для схемы на рис. 3-6 при $u_п=3$.

Значение y_z по (3-7) может оказаться целым числом или неправильной дробью.

В первом случае, y_z-целое число, ширина каждой секции одинакова (рис. 3-7 и 3-8, *а*). Такая обмотка называется *равносекционной.*

Во втором случае, $y_z \neq$ целое число, зубцовые шаги отдельных секций y_{z1}, y_{z2}, ... будут целыми, но не одинаковыми числами, т. е. секции будут охватывать различное число зубцов (рис. 3-8, *б* и 3-9). Такая обмотка называется неравносекционной или *ступенчатой.*

Так как равносекционная обмотка проще ступенчатой в изготовлении, то обычно y_z выбирается одинаковым для всех секций; при этом значение первого частичного шага по (3-7) и выбранному шагу y_z составит:

$$y_1 = u_п \cdot y_z. \qquad (3\text{-}7а)$$

Чтобы подробнее пояснить различие между равносекционной и ступенчатой обмотками, рассмотрим упомянутую выше обмотку по схеме на рис. 3-7, имеющую следующие данные: $K=S=21$; $u_п=3$, $z=K/u_п=7$; $2p=2$; первый частичный шаг составляет $y_1 = K/2p - \varepsilon_к = 10^1/_2 - \varepsilon_к$; соответственно зубцовый шаг будет равен:

$$y_z = y_1/u_п = 3\frac{1}{2} - \varepsilon_z,$$

где ε_z — укорочение шага обмотки в реальных зубцовых делениях:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_к/u_п. \qquad (3\text{-}8)$$

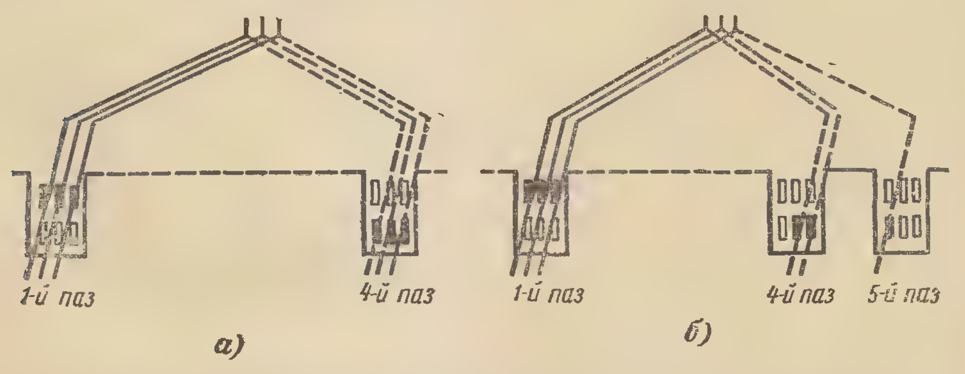


Рис. 3.8. Расположение секционных сторон якорной катушки в пазах.
а — при равносекционной обмотке согласно схеме на рис. 3-7; *б* — при ступенчатой обмотке (рис. 3-9).

Приняв $y_z=3$=целое число, что соответствует $\varepsilon_z=1/2$ и $\varepsilon_к=1\,1/2$, получим по (3-7а) $y_1=9$, т. е. равносекционную обмотку, схема-развертка которой показана на рис. 3-7. В этой обмотке каждая из $u_п$ секций имеет одинаковые зубцовые шаги: $y_{z1}=y_{z2}=y_{z3}=y_z=3$.

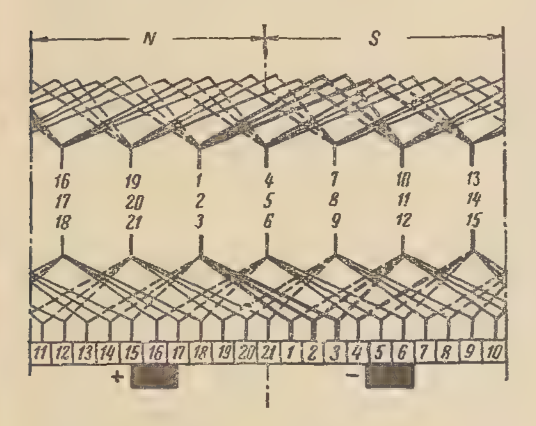


Рис. 3-9. Ступенчатая петлевая обмотка.

Для получения при тех же значениях K и Z ступенчатой обмотки возьмем $\varepsilon_к=1/2$; $\varepsilon_z=1/6$ т. е. примем $y_1=10$; $y_z=3\,1/3$. В этой обмотке секции будут охватывать различное число зубцов: $y_{z1}=y_{z2}=3$; $y_{z3}=4$; в среднем $y_z=\dfrac{y_{z1}+y_{z2}+y_{z3}}{u_п}=3\dfrac{1}{3}$.

Такая обмотка показана на рис. 3-9. Расположение сторон обмоток в пазах якоря как равносекционной, так и ступенчатой изображено на рис. 3-8.

Из-за более сложной технологии изготовления ступенчатых обмоток предпочтение отдают равносекционным.

Ступенчатые обмотки применяются иногда в крупных машинах для улучшения условий коммутации. В этом случае обмотки выполняются обычно стержневыми из полусекций разных размеров.

3-2. ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

При обходе секций петлевой обмотки, соединяемых последовательно (рис. 3-5), получаем следующие соотношения между обмоточными шагами:

$$y=y_1-y_2. \qquad (3\text{-}9)$$

Результирующий шаг y считаем положительным ($y_1>y_2$), если секции при обходе схемы обмотки смещаются направо[1] (см. рис. 3-5, *а*); шаг y считаем отрицательным ($y_1<y_2$), если смещение секций происходит налево (рис. 3-5, *б*).

Обмотка с правым обходом называется *неперекрещенной* ($y>0$), обмотка с левым обходом — *перекрещенной* ($y<0$). В последней имеет место пересечение на стороне коллектора лобовых соединений одной и той же секции. При этом удлиняются лобовые соединения секций по сравнению с лобовыми соединениями неперекрещенной обмотки и соответственно повышается расход обмоточного провода. По этой причине предпочитают применение неперекрещенных обмоток.

Петлевые обмотки делятся на *простые (одноходовые) и сложные (многоходовые)*.

Простая петлевая обмотка. В простой петлевой обмотке все секции соединяются при обходе схемы последовательно одна за другой без пропуска, как изображено на рис. 3-5 и 3-6. Такое соединение осуществимо при условии, что

$$y=y_к=\pm 1. \qquad (3\text{-}10)$$

Знак плюс относится к неперекрещенной обмотке, знак минус — к перекрещенной.

При установке щеток на пластины коллектора, соединенные с секциями (проводниками) обмотки, находящимися в нейтрали магнитного поля, между каждой парой соседних щеток образуется параллельная ветвь обмотки, содержащая секции с одинаковым направлением э. д. с. Отсюда следует, что в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей $2a$ равно числу полюсов машины $2p$:

$$2a=2p. \qquad (3\text{-}11)$$

Соотношение (3-11) характеризует главную особенность простой петлевой обмотки.

---

[1] Указанное направление смещения предполагает нумерацию элементарных пазов и коллекторных пластин слева направо.

Простую петлевую обмотку называют также *простой параллельной* обмоткой.

Для использования всех параллельных ветвей обмотки на коллекторе устанавливают полное число щеток, равное числу нейтралей магнитного поля, т. е. числу магнитных полюсов $2p$ машины. Все положительные щетки соединяют с одним выводным проводом, все отрицательные — с другим.

Для улучшения коммутации и уменьшения пульсаций э. д. с. на выходе машины рекомендуется применять простые петлевые обмотки, у которых выполнено условие

$$K/p = \text{нечетное число}. \quad (3\text{-}12)$$

При числе секций в якорной катушке $u_п > 1$ это условие дополняется следующим:

$$Z/p = \text{нечетное число}. \quad (3\text{-}12а)$$

Сложная петлевая обмотка. Сложная петлевая обмотка образуется из нескольких простых петлевых, присоединенных к общему коллектору; при этом проводники и коллекторные пластины, принадлежащие различным простым обмоткам, чередуются, как показано на рис. 3-10.

Число щеток сложной обмотки, так же как и простой, равно числу полюсов машины. При m простых обмотках, образующих сложную обмотку, тангенциальная ширина каждой щетки по коллектору должна быть не меньше m коллекторных делений, чтобы любая простая обмотка всегда имела контакт со щеткой. Поэтому в сложной петлевой обмотке все простые обмотки включаются параллельно (рис. 3-12) и полное число параллельных ветвей сложной обмотки увеличивается в m раз:

$$2a = m2p. \quad (3\text{-}13)$$

Выражение (3-13) является общим для всех петлевых обмоток; для простой петлевой обмотки $m=1$.

При построении схемы сложной петлевой обмотки 1-ю секцию и соответствующую ей коллекторную пластину условно относят к 1-й простой петлевой обмотке, 2-ю секцию и пластину — ко 2-й простой обмотке, m-ю секцию и пластину — к m-й простой обмотке. Тогда $(m+1)$-я секция и пластина вновь будет относиться к 1-й простой обмотке, $(m+2)$-я — ко 2-й и т. д. (рис. 3-10). Такое распределение секций и коллекторных пластин осуществимо, если принять:

$$y = y_к = \pm m. \quad (3\text{-}14)$$

Это выражение является общим для всех петлевых обмоток.

Остальные шаги сложной обмотки y_1, y_2 и т. д. рассчитываются по тем же формулам, что и для простой петлевой обмотки: (3-5), (3-7) и (3-9).

При построении сложных петлевых обмоток не существует ограничительных условий между числом коллекторных пластин K и числом m простых обмоток. Но следует иметь в виду, что если число K пластин коллектора сложной обмотки не делится на число m простых обмоток, то между последними образуются электрические замкнутые контуры. В общем случае сложной обмотки число таких контуров равно общему наибольшему делителю g значений K и $y_к$, где $y_к = m$.

На рис. 3-10 приведена схема двухходовой ($m=2$) петлевой обмотки с числом $K=16$ и $y_к=2$, для которой наибольший общий делитель между $y_к$ и K равен $g=2$. Следовательно, в этом случае сложная обмотка будет двукратнозамкнутой,

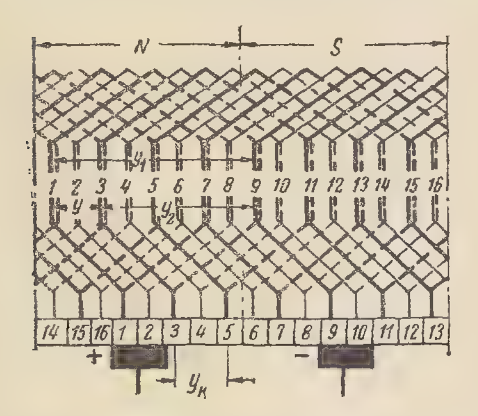


Рис. 3-10. Двухходовая двукратнозамкнутая петлевая обмотка. 1-я простая обмотка вычерчена толстыми линиями; 2-я — тонкими.

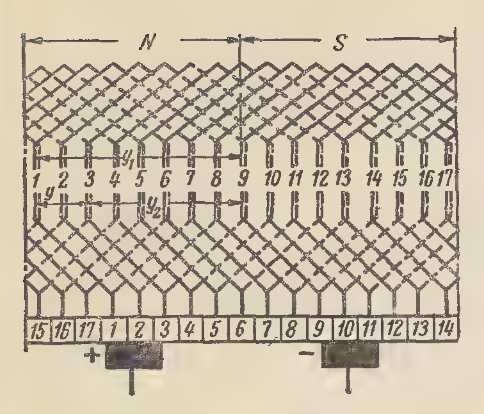


Рис. 3-11. Двухходовая однократнозамкнутая обмотка

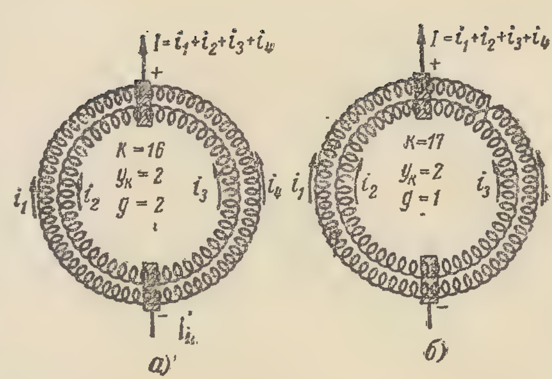


Рис. 3-12. Схема замещения двухходовой петлевой обмотки при $2p=2$; $m=2$; $2a=4$.

а — двукратно замкнутая обмотка (по схеме на рис. 3-10); *б*—однократно замкнутая обмотка (по схеме на рис. 3-11).

т. е. такой, в которой каждая простая обмотка образует отдельный электрический контур. На рис. 3-11 приведена двухходовая сложная обмотка, которая имеет $K=17$ и $y_к=2$. Для этой обмотки $g=1$, т. е. обмотка является однократнозамкнутой, в которой простые обмотки образуют один электрический контур. На рис. 3-12 изображены схемы замещения двухходовых сложных обмоток для этих двух случаев; на схемах видно образование параллельных ветвей; полный ток якоря в обоих случаях складывается из суммы токов параллельных ветвей:

$$I=i_1+i_2+i_3+i_4.$$

Сложные петлевые обмотки называются также *сложными параллельными*. На практике получили применение двухходовые ($m=2$) однократнозамкнутые ($g=1$) обмотки. Сложные петлевые обмотки применяются в машинах постоянного тока на большой ток. В таких машинах требуется повышенное число параллельных ветвей, которое осуществимо или при простой петлевой обмотке, но с увеличенным числом полюсов, или при меньшем числе полюсов, но с применением сложной петлевой обмотки. Последнее решение может оказаться более выгодным.

Для петлевых двухходовых однократнозамкнутых обмоток рекомендуется выбирать

$$K/p = \text{нечетное число}.$$

В этом случае уравнительные соединения можно выполнить на одной стороне якоря, не прокладывая их внутри якорной втулки. Одновременно они будут служить уравнительными соединениями 1-го и 2-го рода (см. § 3-6).

Как показала практика, двухходовые однократнозамкнутые петлевые обмотки ($g=1$) имеют лучшую коммутацию, чем двукратнозамкнутые. В последних для улучшения коммутации выбирают первый частичный шаг нечетным, что дает одинаковую величину полного тока в каждом пазу даже при различных токах в простых обмотках, составляющих сложную.

3-3. ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

В отличие от петлевых волновые обмотки теоретически могут быть выполнены с любым числом a пар параллельных ветвей независимо от числа полюсов.

При обходе последовательно соединенных секций получаем для волновой обмотки следующее соотношение между обмоточными шагами (рис. 3-13):

$$y=y_1+y_2=y_к, \qquad (3\text{-}15)$$

где y_1 — первый частичный шаг, выбираемый по (3-5).

Величина y результирующего шага или $y_к$ шага по коллектору зависит, в частности, от выбора числа параллельных ветвей $2a$ обмотки (см. далее).

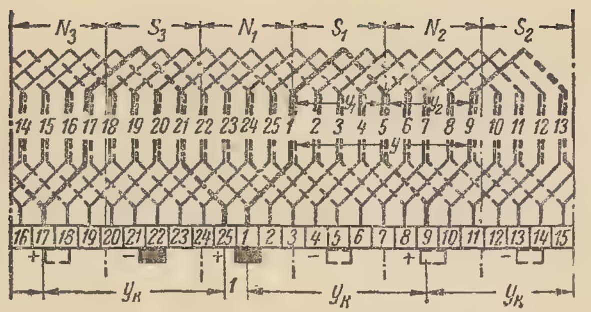


Рис. 3-13. Простая волновая обмотка.
$2p=6$; $K=S=25$; $2a=2$; $y=y_к=8$; $y_1=4$; $y_2=4$.

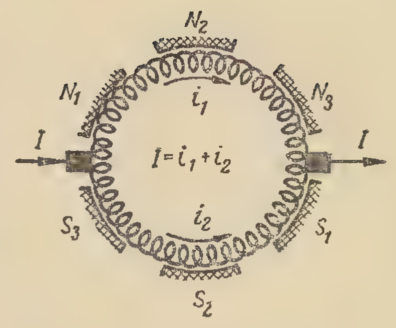


Рис. 3-14. Схема замещения простой и волновой обмоток.
$p=3$; $2a=2$ (для схемы на рис. 3-13).

Из (3-15) следует, что

$$y_2 = y - y_1. \quad (3\text{-}16)$$

По аналогии с петлевыми волновые обмотки разделяются на *простые и сложные.*

Простая волновая обмотка. Основная особенность простой волновой обмотки заключается в том, что при любом числе пар полюсов ($p \geqslant 1$) схема соединений якорных секций образует только две параллельные ветви:

$$2a = 2. \quad (3\text{-}17)$$

Для этого в простой волновой обмотке, прежде чем соединить первую исходную секцию с рядом лежащей (например, с 25-й) как это было в простой петлевой обмотке, переходят к секции (9-й), лежащей примерно в одинаковых магнитных условиях под соседней парой полюсов, затем к (17-й) секции, лежащей под последующей парой полюсов, и т. д. (рис. 3-13). И только после обхода окружности якоря присоединяют последнюю — p-ю по числу секций в обходе — к секции, лежащей рядом с исходной первой секцией. Затем начинают второй обход секций по окружности якоря, соблюдая тот же порядок их соединения. Такие обходы, в количестве равном $K/2p$, продолжают до тех пор, пока не соединят последовательно все секции с одинаковым направлением э. д. с. Эти секции образуют одну параллельную ветвь обмотки якоря. При дальнейших обходах секций образуется другая параллельная ветвь с обратным направлением э. д. с. На рис. 3-14 приведена схема замещения простой волновой обмотки, поясняющая образование параллельных ветвей. Из схемы следует, что применяемый в волновой обмотке порядок *последовательного соединения* всех секций с одинаковым направлением э. д. с. как бы превращает многополюсную машину в двухполюсную, в которой полюс одной полярности расщеплен на p частичных полюсов. Простую волновую обмотку называют также *последовательной.*

Результирующий шаг простой волновой обмотки определяется из следующего условия: при обходе секций по окружности якоря соединяют p секций, отстоящих одна от другой на $y_к$ коллекторных делений, и не доходят (или переходят) относительно исходной первой секции, соединенной с первой коллекторной пластиной, на одно коллекторное деление (рис. 3-13):

$$py_к = K \mp 1. \quad (3\text{-}18)$$

Из условия (3-18) находим шаг по коллектору:

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p} = \text{целое число.}$$

Знак минус в формуле соответствует неперекрещенной обмотке, знак плюс — перекрещенной. По той же причине, что и в петлевых обмотках, предпочитают выполнять волновую обмотку неперекрещенной.

Согласно (3-4)

$$y = y_к = \frac{K \mp 1}{p}. \quad (3\text{-}19)$$

Из условия (3-19) следует, что простая волновая обмотка требует определенных соотношений между величинами K и p. Например, в четырехполюсной машине ($p=2$) число коллекторных пластин K должно быть нечетным.

Требование определенного соотношения между K и p приводит в не-

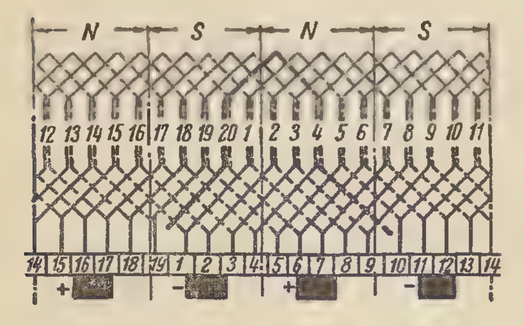


Рис. 3-15. Простая волновая обмотка с мертвой секцией.

$2p=4$; $2a=2$; $K=S=19$; $S_п=20$; $S_м=1$; $y=y_к=9$; $y_1=4$.

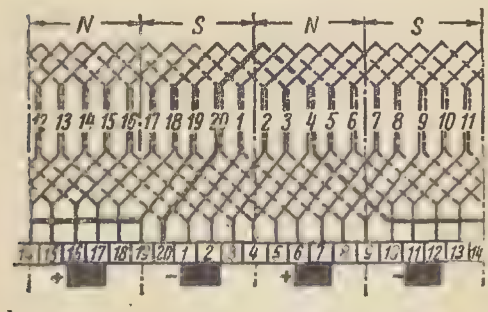


Рис. 3-16. Простая волновая обмотка, искусственно замкнутая.

$2p=4$; $2a=2$; $K=S=20$; $y_1=4$.

которых случаях к применению так называемых *мертвых* секций. Например, равносекционная обмотка с четным числом $u_п$ секций в якорной катушке имеет полное число секций $S_п$ четным [см. (3-3)]. Применение такой обмотки для четырехполюсной машины ($p=2$) не позволит использовать все $S_п$ секций, так как согласно (3-19) значение K и равное ему значение S секций, включенных в схему обмотки, должны быть нечетными. Следовательно, часть секций, равная $S_м=S_п-S$, не используется. Эти секции называются *мертвыми*. На рис. 3-15 показана обмотка с мертвой секцией. Для механической балансировки вращающегося якоря и надежного крепления проводников мертвые секции закладываются в пазы якоря наряду с активными.

Мертвые секции могут быть использованы в так называемой искусственно замкнутой обмотке. Для этого обмотку с мертвыми секциями и полным комплектом коллекторных пластин ($K=S_п$) разрезают в соответствующих местах и включают в эти разрезы мертвые секции. Места разрезов выбирают таким образом, чтобы замыкающие (мертвые) секции лежали в смежных обходах обмотки. Например, для обмотки по рис. 3-16 мертвая секция *20* включена в разрез между секциями *10* и *19*. В результате в обходе между коллекторными пластинами *19* и *20* включается одна секция вместо двух (при $p=2$). Такая обмотка может быть представлена в виде обмотки с $K=21$, у которой удалены при одном обходе одна секция и одна пластина.

Обмотки с мертвыми секциями и искусственно замкнутые являются несимметричными (см. § 3-5). Однако их несимметрия незначительно сказывается на работе машины, так как число секций в параллельной ветви бывает достаточно большим. Искусственно замкнутые обмотки на практике встречаются редко.

Из анализа условия (3-18) установлено, что простую волновую обмотку можно выполнить симметричной, если $u_п$ и p не имеют общего делителя.

Не рекомендуется применение мертвых секций в машинах с номинальной мощностью $P_н > 60-80$ *квт*, а также при числе коллекторных пластин $K < 100$.

При волновой обмотке щетки могут быть установлены на двух щеточных болтах, на одном — положительные, на другом — отрицательные. Но с целью уменьшения числа щеток на болте, определяемого величиной тока якоря, выбирают полное число щеточных болтов по числу геометрических нейтралей, равному числу полюсов. В этом случае число щеток на болте уменьшается в p раз, соответственно чему уменьшается длина коллектора, а следовательно, и общая длина машины.

Возможность установки $2p$ щеточных болтов обусловлена тем, что щетка заданной полярности, стоящая на коллекторной пластине одной из нейтральных зон, соединена через якорные секции с пластинами, отстоящими одна от другой на расстоянии примерно двух полюсных делений $y_к \approx K/p$ и имеющими ту же полярность, что и исходная пластина. Электродвижущаяся сила в этих секциях, находящихся в нейтральных зонах, практически не наводится. На рис. 3-13 дополнительные щетки обведены пунктирной линией и не зачернены. Из схемы видно, что положительные щетки (+) соединены секциями *1* и *9*.

Сложная (многоходовая) волновая обмотка. Сложная волновая обмотка состоит из m простых волновых обмоток, присоединенных к одному коллектору таким образом, что проводники и коллекторные пластины простых обмоток равномерно чередуются. Аналогично сложной петлевой обмотке ширина щеток в сложной волновой обмотке должна быть не меньше m коллекторных делений для обеспечения электрического контакта со всеми простыми обмотками. В результате последние включаются параллельно и полное число параллельных ветвей в сложной обмотке увеличивается в m раз:

$$2a = m2. \qquad (3\text{-}20)$$

Из условия (3-20) следует, что число m ходов сложной обмотки равно числу пар параллельных ветвей:

$$a = m. \qquad (3\text{-}21)$$

Для равномерного чередования простых обмоток в сложной волновой после одного обхода секций вокруг окружности якоря секция следующего обхода присоединяется не к соседней коллекторной пластине, находящейся рядом с первой, а к пластине, отстоящей от первой на расстоянии m коллекторных делений. Отсюда следует условие образования сложной волновой обмотки по аналогии с (3-18):

$$py_к = K \mp m = K \mp a. \qquad (3\text{-}22)$$

Из (3-22) находим шаг по коллектору и равный ему результирующий шаг сложной волновой обмотки:

$$y_к = y = \frac{K \mp a}{p}. \qquad (3\text{-}23)$$

Так же как и в простой волновой обмотке, знак минус относится к неперекрещенной, а знак плюс — к перекрещенной обмоткам.

Формула (3-23) пригодна и для простой волновой обмотки ($a=1$). Остальные шаги сложной волновой обмотки рассчитываются аналогично шагам простой обмотки по (3-5), (3-7) и (3-15).

Для сложной волновой обмотки применимы аналогичные указания относительно выбора значений K и p и наличия мертвых секций, что и для простой волновой обмотки.

Сложная волновая обмотка может быть однократно- или g-кратнозамкнутой, т. е. образовывать g электрических контуров, где g — общий наибольший делитель величин K и $y_к$.

Для обеспечения симметрии в сложных волновых обмотках (см. § 3-5) рекомендуется выбирать K/a=целое число; Z/a=целое число.

Сложная волновая обмотка называется также *последовательно-параллельной* или *множественно-последовательной.*

3-4. КОМБИНИРОВАННАЯ (ЛЯГУШЕЧЬЯ) ОБМОТКА

Комбинированная, или лягушечья, обмотка применяется в многополюсных ($p>1$) машинах постоянного тока, главным образом в машинах большой мощности. Впервые лягушечья обмотка была предложена Латуром в 1910 г. Подробная теория и описание ее конструктивного исполнения изложены в работах А. И. Левитуса [Л. 38] и В. Т. Касьянова [Л. 39].

Представляя собой сочетание петлевой и волновой обмоток при общем коллекторе, лягушечья обмотка выполняется без уравнительных соединений. Она укладывается в пазах в четыре слоя, по два на каждую из составляющих обмоток. Число проводников, их сечение и число параллельных ветвей петлевой и волновой

обмоток берутся одинаковыми:

$$\left.\begin{aligned} N_п &= N_в; \\ s_п &= s_в; \\ 2a_п &= 2a_в = m2p, \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}24)$$

где m — множественность сложной петлевой обмотки (обычно принимают $m=1$); индекс п относится к петлевой обмотке, а индекс в — к волновой.

Очевидно, волновая обмотка имеет множественность, согласно (3-24) равную:

$$a_в = mp. \qquad (3\text{-}25)$$

Как петлевая, так и сложная волновая обмотки в отдельности нуждаются в уравнительных соединениях (см. § 3-6).

В лягушечьей обмотке составляющие ее обмотки являются одна для другой уравнительными соединениями, т. е. для петлевой обмотки волновая обмотка выполняет функции уравнительных соединений 1-го и 2-го рода, а для волновой петлевая обмотка — функции уравнительных соединений 2-го рода.

Большое преимущество лягушечьей обмотки состоит в том, что ее петлевая и волновая обмотки, выполняя взаимно функции уравнительных соединений, являются в то же время активными действующими обмотками. Для полного уравновешивающего действия составляющих обмоток индуктивности их секций должны быть одинаковыми и распределение магнитной индукции под полюсами идентичным. В противном случае возможно ухудшение коммутации машины. Для возможно более совершенного выравнивания индуктивностей якорных секций петлевой и волновой обмоток проводники волновой обмотки укладывают в 1-й и 4-й, а проводники петлевой — во 2-й и 3-й слои паза (рис. 3-17).

Присоединение секций петлевой и волновой обмоток к общему коллектору обусловливает определенные соотношения между шагами обмоток. Существуют две основные схемы соединения секций лягушечьей обмотки [Л. 39]: а) нормальная схема; б) схема Латура — Перре.

Согласно первой (рис. 3-18) две секции петлевой обмотки располагаются одна от другой на расстоянии двойного полюсного деления, т. е. в одинаковых магнитных условиях. Следовательно, две любые идентичные точки петлевых секций могут быть соединены уравнительным про-



Рис. 3-17. Расположение в пазу секционных сторон лягушечьей обмотки.

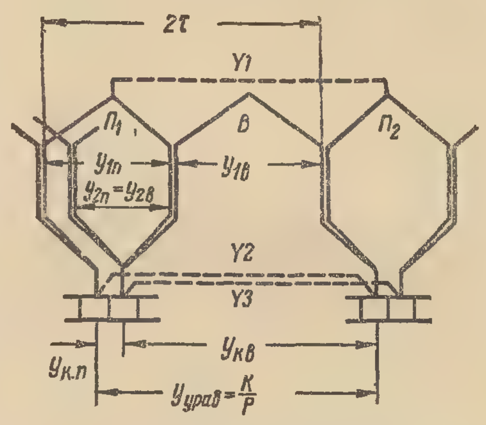


Рис. 3-18. Лягушечья (комбинированная) обмотка по нормальной схеме.

водником (на рис. 3-18, например, пунктирные линии *У1*, *У2*, *У3*), так как разность потенциалов между этими точками равна нулю.

Секция волновой обмотки *В* образуется проводниками, уложенными рядом с близлежащими сторонами секций $П_1$ и $П_2$ петлевой обмотки (рис. 3-18) и присоединяется к коллекторным пластинам, соединенным с теми же сторонами петлевой секции. Нетрудно убедиться, что в замкнутом контуре, образованном волновой секцией и любым из указанных выше уравнительных проводников, сумма э. д. с. равна нулю. Поэтому включение волновой секции не нарушает равновесия э. д. с. петлевой обмотки. Из рис. 3-18 получаем следующие соотношения

для шагов петлевой и волновой секции нормальной лягушечьей обмотки:

$$y_{1п} + y_{1в} = \frac{S}{p} = \frac{K}{p}; \qquad (3\text{-}26)$$

$$y_{к.п} + y_{к.в} = \frac{K}{p}. \qquad (3\text{-}27)$$

Из совместного решения уравнений (3-9), (3-15), (3-26) и (3-27)

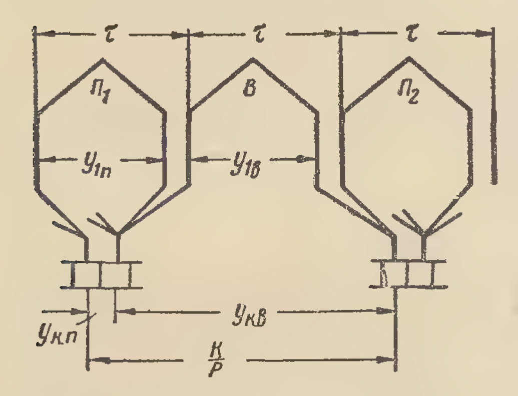


Рис. 3-19. Лягушечья (комбинированная) *обмотка по схеме Латура — Перре.*

следует, что вторичные шаги петлевой и волновой обмоток одинаковы:

$$y_{2п} = y_{2в}. \qquad (3\text{-}28)$$

Остальные шаги обмоток определяются, как указывалось выше по формулам (3-5), (3-7) (3-14) и (3-23).

При выборе шагов по коллектору $y_{к.п}$ и $y_{к.в}$ следует стремиться к тому, чтобы обе составляющие обмотки или хотя-бы одна из них была однократнозамкнутой ($g=1$). Лягушечья обмотка по нормальной схеме обычно выполняется равносекционной, хотя может быть и ступенчатой. В технологическом отношении различают разрезные (только одновитковые) и неразрезные (обычно многовитковые) лягушечьи обмотки.

Для образования второй схемы лягушечьей обмотки, предложенной Латуром и Перре, в диаметральной лягушечьей обмотке с диаметральными шагами переносят правые стороны петлевой ($П_1$) и волновой ($В$) секций в соседние пазы, как показано на рис. 3-19. В результате лягушечья обмотка по Латуру — Перре получается хордовой укороченной с одинаковыми первичными шагами:

$$y_{1п} = y_{1в} \qquad (3\text{-}29)$$

Такое исполнение возможно при условии, что

$$Z/2p = \text{целое число}. \qquad (3\text{-}30)$$

Укорочение первичных шагов улучшает условия коммутации лягушечьей обмотки Латура — Перре.

При укладке в пазы любой лягушечьей обмотки образуются, как отмечалось выше (рис. 3-17), четыре слоя. От этого усложняются изготовление и ремонт лягушечьей обмотки, снижается коэффициент заполнения паза и ухудшаются условия ее охлаждения. Наиболее распространенным является исполнение лягушечьей обмотки, при котором петлевые секции изготавливаются цельными, а волновые — разрезными с соединением хомутиками на стороне якоря, обратной коллектору (рис.3-20, цифрами указаны номера слоев).

Лягушечьи обмотки нашли применение в крупных машинах постоянного тока, в частности в машинах, предельных по мощности, по скорости вращения, в реверсивных двигателях постоянного тока с уменьшенным маховым моментом, т. е. с уменьшенным диаметром якоря, машинах не имеющих компенсационной обмотки, небольших быстроходных машинах, в которых затруднено устройство уравнительных соединений.

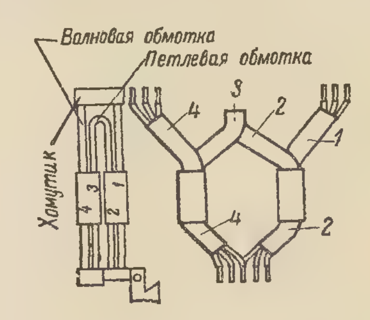


Рис. 3-20. Катушка лягушечьей (комбинированной) обмотки.

3-5. УСЛОВИЯ СИММЕТРИИ ОБМОТОК

Под симметричной обмоткой следует понимать обмотку якоря, которая при работе машины с симметричным полем имеет одинаковые э. д. с. и сопротивления параллельных ветвей. При отсутствии симметрии обмотки между ее параллельными ветвями возникают уравнительные токи. Анализ симметрии обмоток наглядно производят с помощью э. д. с. якорных секций обмоток. Как известно, для каждой пары соседних параллельных ветвей может быть построен потенциальный многоугольник векторов э. д. с. якорных секций. Число сторон такого многоугольника равно полному числу якорных секций S, или числу коллекторных пластин K, деленному на число пар параллельных ветвей обмотки a, число потенциальных многоугольников равно числу пар a параллельных ветвей. С помощью потенциального многоугольника можно определить разность потенциалов между любой парой коллекторных пластин.

При симметричной обмотке стороны потенциальных многоугольников каждой пары параллельных ветвей совпадают. Совмещенные вершины многоугольников соответствуют коллекторным пластинам, имеющим одинаковый потенциал. Равнопотенциальные пластины могут быть соединены уравнительными соединениями (см. § 3-6).

Условия симметрии обмоток показывают, какие требования должны быть предъявлены к обмоткам, чтобы потенциальные многоугольники параллельных ветвей совпали. Для двухслойных обмоток существуют три условия симметрии:

1) $Z/a =$ целое число; (3-31)

2) $u_п = S/Z = K/Z =$ целое число; (3-32)

3) $2p/a =$ целое число. (3-33)

Условие (3-32) удовлетворяет требованию укладки одинакового четного числа проводников в пазу; условие (3-31) обеспечивает совпадение потенциальных многоугольников параллельных ветвей обмотки, а условие (3-33) — одинаковое расположение секций параллельных ветвей в магнитном поле.

Условие (3-33) автоматически выполняется для простых петлевых обмоток; для сложных петлевых обмоток это условие, как показал опыт успешно работающих машин, не является обязательным. В. Т. Касьянов [Л. 39] считает возможным для петлевых обмоток принять следующие условия *практически достаточной симметрии:*

1) $K/p =$ целое число, не кратное m; (3-34)

2) $Z/p =$ целое число, не кратное m; (3-35)

3) $u_п = K/Z =$ целое число, не кратное m. (3-36)

Для простых петлевых обмоток условия практически достаточной симметрии совпадают с «точными» условиями (3-31), (3-32) и (3-33); для сложных петлевых обмоток условие (3-33) преобразуется в выражение

$$2/m = \text{целое число},$$

что осуществимо только в двухходовых обмотках ($m=2$). Согласно условиям практически достаточной симметрии возможно выполнение сложной петлевой обмотки, имеющей $m \geqslant 2$; известны обмотки, удовлетворительно работающие при $m=4$.

Для простой волновой обмотки ($a=1$) условия симметрии такие же, как и для простой петлевой, за исключением ограничения, вызванного соотношением (3-19). Последнее обусловливает требование отсутствия общих наибольших делителей между значениями Z и p, а также между $u_п$ и p.

Иногда условие (3-32) не выполняют, т. е. берут $u_п =$ целое число, но при этом стремятся ограничиться только одной мертвой секцией, т. е. принимают

$$\frac{K+1}{Z} = \text{целое число}.$$

В сложной волновой обмотке выбор $u_п$, Z и a еще более ограничен из-за требования (3-23). В табл. 3-1

Таблица 3-1

Значения $u_п = K/Z$ для симметричных волновых обмоток

a	p									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
1	3, 5	2, 4, 5	3, 5	2, 3, 4	5	2, 3, 4, 5	3, 5	2, 4, 5	3	5
2	—	2, 4, 5	3, 5	2, 3, 4	2, 4, 5	2, 3, 4, 5	3, 4	2, 4, 5	2, 3, 4	5
3	—	—	—	—	3, 5	—	—	2, 4, 5	—	3, 5
4	—	—	—	—	—	—	3, 5	—	—	2, 4, 5
5	—	—	—	—	—	—	—	—	3, 5	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3, 5

приведены значения $u_п$, удовлетворяющие требованиям симметрии (3-31), (3-32) и (3-33). При этом стремятся выполнить сложную волновую обмотку однократнозамкнутой, т. е. выбрать числа K и $y_к$ взаимно простыми.

В лягушечьих обмотках достаточно удовлетворить, как показывает практика их применения, условия (3-34), (3-35) и (3-36); при этом выполняют волновую обмотку однократнозамкнутой [Л. 39].

3-6. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Различают уравнительные соединения первого рода, применяемые в простых петлевых обмотках, и уравнительные соединения второго рода, применяемые в сложных петлевых и волновых обмотках. С помощью уравнительных соединений в обмотках объединяются точки, имеющие теоретически одинаковые потенциалы. Как указано в § 3-5, равнопотенциальные точки определяются по совмещенным вершинам (или сторонам) потенциальных многоугольников э.д.с.

Независимо от рода уравнительных соединений их полное число $N_у$ равно числу сторон потенциального многоугольника обмотки:

$$N_у = K/a.$$

Каждое уравнительное соединение объединяет a равнопотенциальных точек обмотки. Для выполнения уравнительных соединений с одной стороны якоря необходимо выполнить условие

$$p/a = \text{целое число}. \qquad (3\text{-}37)$$

В этом случае равнопотенциальные точки могут быть выбраны как на стороне коллектора, так и на обратной стороне якоря в лобовых частях обмотки.

Для удешевления машины обычно выполняют неполное число уравнительных соединений. Чтобы найти возможное число уравнительных соединений, следует разложить число $N_у$ на простые множители, например:

$$N_у = N_{у1} N_{у2} N_{у3}.$$

Тогда неполное число уравнительных соединений может быть следующим [Л. 87]:

$$N_{у1};\ N_{у2};\ N_{у3};\ N_{у1}N_{у2};\ N_{у1}N_{у3};\ N_{у2}N_{у3}.$$

Чем больше число уравнительных соединений, тем совершеннее их выравнивающее действие.

Для четырехполюсных машин небольшой мощности выполняют три-четыре уравнительных соединения на обмотку.

В машинах средней и большой мощности ($P_н > 100$ *квт*) применяются уравнительные соединения для 20—30% всего количества секций якоря. И только в крупных машинах ответственного назначения, например в прокатных двигателях и генераторах, турбовозбудителях и др., выполняют полное число уравнительных соединений.

Шаг уравнительных соединений как первого, так и второго рода выбирается равным:

а) для петлевых обмоток

$$y_у = K/p; \qquad (3\text{-}38)$$

б) для волновых обмоток

$$y_у = K/a. \qquad (3\text{-}39)$$

Уравнительные соединения располагаются как под лобовыми частями обмотки, так и со стороны коллектора. В крупных машинах уравнительные соединения конструктивно совмещают с петушками коллектора, располагая их в плоскости, перпендикулярной оси вала (см. рис. 3-33). Более подробно конструктивное исполнение уравнительных соединений рассмотрено в § 3-8.

3-7. ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОБМОТОК И ТАБЛИЦЫ УРАВНИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В практических схемах обмоток, используемых на производстве, достаточно указать шаги по пазам и коллектору.

Для примера рассмотрим практические схемы простых петлевой и волновой обмоток.

1. Дана петлевая обмотка, имеющая $Z=108$; $S=K=432$; $u_п=4$; $2p=2a=8$. Если обмотку выполнить равносекционной, то ее шаги составят:

$$y_z=13;\ \varepsilon_z=\frac{1}{2};\ y_1=u_п y_z=$$
$$=52;\ y_2=51;\ y=y_к=1.$$

Обмотка изготовляется из 108 катушек по четыре одинаковые секции в каждой. На рис. 3-21 приведе-

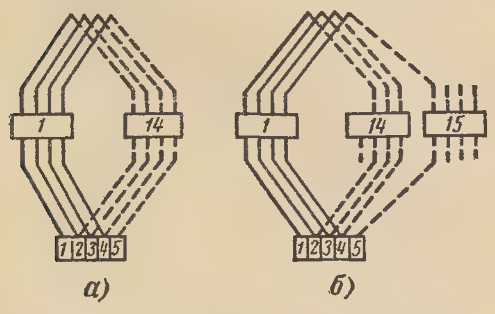


Рис. 3-21. Практическая схема петлевой обмотки.

а — равносекционная обмотка; *б* — ступенчатая обмотка.

на практическая схема этой обмотки. Числа в больших прямоугольниках обозначают номера пазов, числа в малых прямоугольниках — номера коллекторных пластин. Кроме того, обычно указывается относительное расположение первого паза и первой коллекторной пластины.

Если шаг по пазам выбрать равным нецелому числу, например для предыдущей обмотки взять средний зубцовый шаг $y_z=13^1/_4$, что соответствует $\varepsilon_z={}^1/_4$ и зубцовым шагам $y_{z1}=y_{z2}=y_{z3}=13$ для первой, второй и третьей секций и $y_{z4}=14$ для четвертой секции якорной катушки, то получится ступенчатая обмотка со следующими частичными шагами:

$$y_1=u_п y_z=4\cdot 13\frac{1}{4}=53;\ y_2=52.$$

Практическая схема такой ступенчатой обмотки изображена на рис. 3-21, *б*.

2. Рассмотрим практическую схему волновой обмотки со следующими данными:

$$Z=41;\ S=K=123;\ u_п=$$
$$=3;\ 2p=4;\ 2a=2;$$

шаг по коллектору составит:

$$y_к=\frac{K\mp a}{p}=\frac{123-1}{2}=61.$$

Для равносекционной обмотки зубцовый шаг будет равен $y_z=10$; $\varepsilon_z={}^1/_4$; остальные шаги составят: $y_1=u_п y_z=30$; $y_2=y-y_1=31$.

Обмотка выполняется из 41 якорной катушки по три секции в каждой.

Практическая схема обмотки приведена на рис. 3-22. Обозначения пазов и коллекторных пластин выбраны те же, что и для петлевой обмотки.

При ступенчатой обмотке средний зубцовый шаг может составить:

$$y_z=10\frac{1}{3};\ \varepsilon_z=-1/12.$$

Тогда для частичных шагов получим следующие значения:

$$y_1=u_п y_z=31;\ y_2=y-y_1=$$
$$=61-31=30.$$

Соответственно зубцовые шаги для отдельных секций якорной катушки будут:

$$y_{z1}=y_{z2}=10;\ y_{z3}=11.$$

Практическая схема такой ступенчатой обмотки показана на рис. 3-22, *б*.

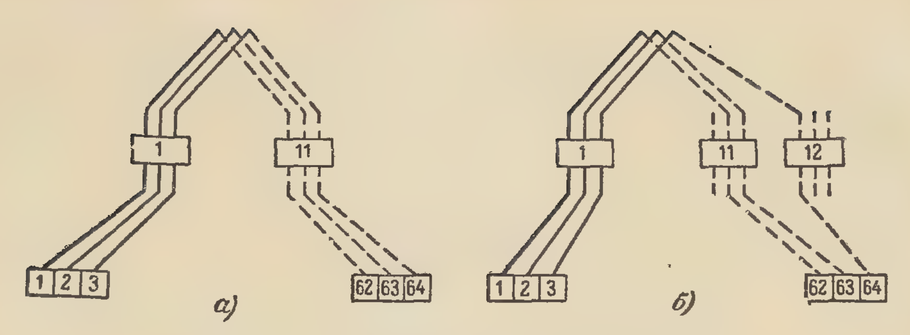


Рис. 3-22. Практическая схема волновой обмотки.

а — равносекционная обмотка; *б* — ступенчатая обмотка.

3. Рассмотрим практическую схему волновой обмотки с мертвой секцией, имеющей следующие данные: $Z=42$; $2p=4$; $u_п=2$; $2a=2$. На якоре укладывается $S_п=u_пZ=$ $=2\cdot 42=84$ секции. Для получения шага по коллектору $y_к$=целое число необходимо взять секций S на одну меньше: $S=K=S_п-1=84-1=83$.

Шаги обмотки составят:

$$y_к=\frac{K-1}{p}=41;\ y_z=10;\ \varepsilon_z=\frac{1}{2};$$

$$y_1=u_пy_z=20;$$

$$y_2=21.$$

Для обмотки изготовляются 42 якорные катушки по две секции в каждой. В одной из катушек концы одной секции укорачиваются. Эта секция называется мертвой и не включается в схему обмотки. На рис. 3-23 показана практическая схема такой обмотки. Наряду с нормальной якорной катушкой изображена катушка с мертвой секцией. Последняя обведена жирной линией.

Для уравнительных соединений схему обычно не вычерчивают, а приводят таблицы этих соединений. Например, для петлевой обмотки, рассмотренной в п. 1 настоящего параграфа, шаг уравнительных соединений равен:

$$y_у=K/p=432/4=108.$$

Возможное число равнопотенциальных точек для каждого соединения составляет $a=4$.

Если уравнительные соединения выполнять со стороны коллектора по одному на паз, то получим следующую нумерацию коллекторных пластин, присоединяемых к одному уравнительному соединению.

№ уравнительного соединения	№ коллекторных пластин
1	1—109—217—325
2	5—113—221—329
3	9—117—225—333
. . .	. . . .
27	105—213—321—429

Коллекторные пластины 1, 109, 217 и 325 1-го уравнительного соединения соединены с секциями, находящимися соответственно в 1, 28, 55 и 82-м пазах якоря. На 108 пазов приходится 27 уравнительных соединений.

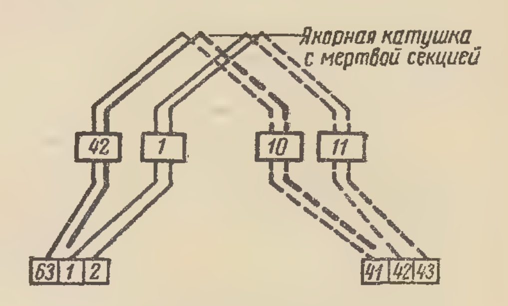


Рис. 3-23. Практическая схема волновой обмотки с мертвой секцией.

Сечение каждого соединения принимают равным 20—50% поперечного сечения эффективного проводника обмотки якоря. Для сохранения механической балансировки уравнительные соединения равномерно распределяют по окружности якоря.

3-8. О ВЫПОЛНЕНИИ ОБМОТОК

Якорные обмотки машины постоянного тока выполняют из медных обмоточных проводов, имеющих эмалевую, эмальволокнистую или волокнистую изоляцию. В последние годы провода с эмалевой изоляцией все более вытесняют другие марки обмоточных проводов. Провода с эмалевой изоляцией, как отмечалось, имеют в 1,5—3 раза меньшую толщину слоя изоляции, чем провода с волокнистой изоляцией. Гладкая поверхность эмалированных проводов облегчает укладку обмотки, что позволяет повысить коэффициент заполнения паза медью на 5—7%. Эмалевая изоляция более теплопроводна, что приводит к снижению перегревов машины. Однако в машинах малой мощности со скоростями вращения свыше 5 000 *об/мин*, а также в машинах мощностью более 10 *квт* не рекомендуется применять провода с эмалевой изоляцией из-за термопластичности эмали; эмалевая пленка при температуре 170° С размягчается. В этих случаях вместо обычно применяемых обмоточных проводов марок ПЭВ (класс А) и ПЭТВ (класс В), берут провода марок ПЭЛШКО (класс А), и ПСД или ПСДТ (класс В).

Конструктивное выполнение якорных обмоток машины постоянного тока зависит от вида сердечника якоря. Якоря средних, больших и крупных машин выполняют с открытыми пазами. Открытые пазы с параллельными стенками (рис. 3-24 и 3-25) допускают укладку прямоугольных проводов, при которой повышается использование площади паза по сравнению с укладкой в паз круглых проводов.

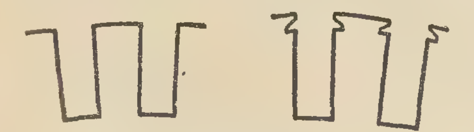


Рис. 3-24. Открытые пазы с креплением обмотки при помощи бандажей.

Рис. 3-25. Открытые пазы с креплением обмотки при помощи клиньев.

В машинах с диаметром якоря <200 *мм* обычно применяют полузакрытые пазы грушевидной формы (рис. 3-26). Это объясняется тем, что при открытых пазах происходит заметное сужение зубцов в их основании, могущее привести к недопустимому снижению механической прочности зубцов и их чрезмерному магнитному насыщению. При полузакрытых пазах обмотка якоря выполняется из круглого провода. Она в этом случае выполняется из мягких секций, проводники которых вкладывают (всыпают) в пазы по одному или по два через прорези (шлицы) пазов. Соответственно способу укладки такие обмотки называются *всыпными*.



Рис. 3-26. Полузакрытые грушевидные пазы.

Для всыпных обмоток применяют круглые провода, марки которых указаны в § 3-9 (табл. 3-2) (см. также табл. 2-7).

По возможности не следует брать провода больших диаметров, жесткость которых затрудняет укладку обмоток и приводит к значительной повреждаемости изоляции при укладке. Кроме того, при больших диаметрах проводов размеры щели паза увеличиваются, что вызывает повышение магнитного сопротивления воздушного зазора, а следовательно, и размеров обмотки возбуждения. Для машины постоянного тока мощностью до 9 *квт* при 1 500 *об/мин* следует считать предельным диаметром провода 1,62 *мм* [Л. 27].

В якорных обмотках из прямоугольных проводников обмоточный провод может быть изолированным или голым. В машинах мощностью от 10 до 200 *квт* обмотки выполня-

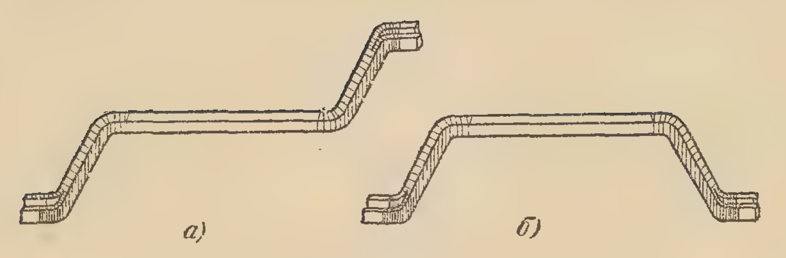


Рис. 3-27. Стержни полусекций.

а — волновая обмотка; *б* — петлевая обмотка.

ются из прямоугольных проводов марок ПБД, ПСД, ПСДТ или из голой прямоугольной меди, изолированной стеклотканью, микалентой или стекломикалентой. При круглых проводах получаются многовитковые секции ($w_c > 1$).

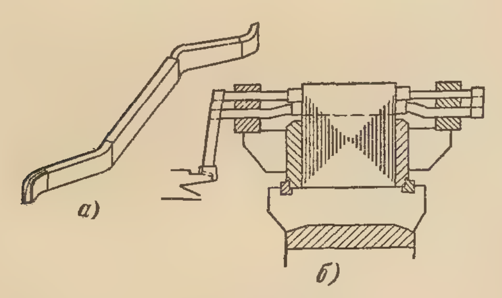


Рис. 3-28. Стержневая обмотка.

а — полусекция обмотки; *б* — обмотка уложенная в якорь.

При выборе числа проводников N и коллекторных пластин K стремятся к тому, чтобы число витков в секции было одинаковым. В крайнем случае, если необходимо сохранить число коллекторных пластин K и число N проводников якоря, определяющее магнитный поток машины, можно выполнить якорную катушку из секций с различным числом витков, но в среднем равным $w_c \approx N/2K$. И в том, и в другом случаях якорная катушка выполняется в виде мягкой секции на шаблоне.

При проводниках прямоугольного сечения секции могут быть многовитковыми и одновитковыми. Последние обычно получаются при проводниках большого сечения.

По выполнению якорные обмотки современных машин постоянного тока подразделяются на два типа: стержневые и катушечные.

Стержневыми обмотками называются обмотки с секциями, состоящими из двух полусекций (рис. 3-27). Полусекции, после того как они заложены в паз, со стороны коллекторов присоединяются при помощи петушков к коллекторным пластинам, а с противоположной стороны соединяются при помощи хомутиков, надеваемых на отогнутые концы стержней (рис. 3-28).

Катушечными обмотками в противоположность стержневым называются обмотки, секции которых выполнены целым проводником.

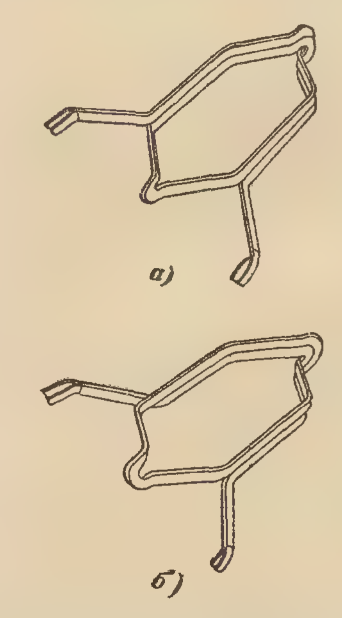


Рис. 3-29. Якорные катушки волновой обмотки, состоящие из двух секций с двумя витками в каждой.

а — с двойной головкой; б — с простой головкой.

На рис. 3-29 изображены катушки волновой обмотки, а на рис. 3-30 — катушки петлевой обмотки.

На рис. 3-29, *а* и 3-30, *а* показаны катушки с перекрещенной или двойной головкой со стороны, противоположной коллектору. Такие катушки получили в практике большое распространение, так как они позволяют осуществить более простое присоединение выводных концов к коллекторным пластинам, чем катушки с неперекрещенной, или простой, головкой, показанные на рис. 3-29, *б* и 3-30, *б*. Присоединение выводных концов катушек с простыми головками представляет некоторые затруднения, которые возрастают при увеличении сечения проводников.

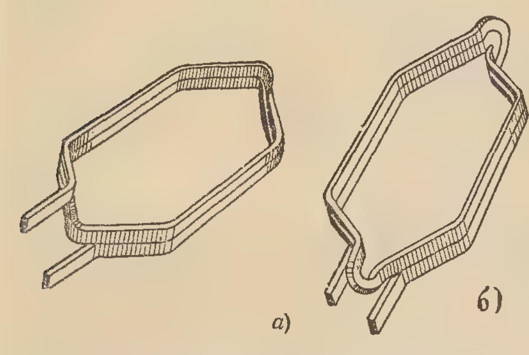


Рис. 3-30. Якорные катушки петлевой обмотки, состоящие из одной секции с двумя витками.

а — с двойной головкой; *б* — с простой головкой.

Катушечные обмотки, как правило, выполняются в виде равносекционных. Катушки таких обмоток заготовляются при помощи шаблонов, изолируются и в готовом виде закладываются в пазы якоря.

Стержневые обмотки выполняются равносекционными и ступенчатыми. В крупных машинах с тяжелыми условиями коммутации предпочитают ступенчатые обмотки, хотя они и более сложны в изготовлении.

Крепление обмоток осуществляется проволочными бандажами или клиньями (см. гл. 9). Бандажи накладываются на лобовые части обмоток якоря, а при открытых пазах и по длине сердечника якоря. Ширину бандажа на якоре не делают более 25 *мм*. Бандажи применяются в машинах малой и средней мощности с диаметром якоря до 200—250 *мм*. Для бандажей берется специальная стальная проволока с прочностью на разрыв примерно 180 $кГ/мм^2$. В машинах с тяжелыми условиями коммутации, а также при большой частоте перемагничивания якоря (более 50 *гц*) бандажи делают из высокопрочной немагнитной проволоки.

Под проволочными бандажами укладывается подбандажная изоляция. Наружный диаметр бандажей не должен превышать внешнего диаметра якоря.

Для механической связи проволок в бандаже применяются скрепки из белой жести, охватывающие в нескольких местах по окружности каждый бандаж.

В машинах с открытыми пазами и высокой окружной скоростью якоря обмотка крепится клиньями. Клинья выполняются из твердых пород дерева (бук) или прессованных материалов (гетинакс, стеклотекстолит и т. п.).

Лобовые части обмоток опираются на обмоткодержатели. Перед укладкой обмотки обмоткодержатели изолируются.

При отсутствии обмоткодержателей, как это имеет место в малых машинах, изолируются вал и торцы сердечника якоря.

Уравнительные соединения конструктивно делаются в виде колец (рис. 3-31) или вилок (дужек), как показано, например, на рис. 3-32.

При уравнительных соединениях в виде колец к последним припаивают проводники, соединенные с соответствующими секциями. Кольцевые уравнители располагают обычно на обмоткодержателях лобовых частей со стороны якоря, обратной по отношению к коллектору.

При уравнительных соединениях в виде вилок концы последних припаиваются или непосредственно к лобовым частям обмотки (рис. 3-32, *а*), или к петушкам коллектора (рис. 3-32, *б*).

В крупных машинах с большим диаметром якоря уравнительные соединения часто выполняют таким образом, что они одновременно являются петушками коллектора. На

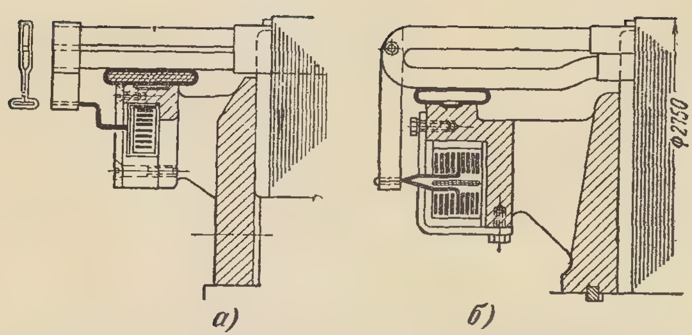


Рис. 3-31. Уравнительные соединения в виде колец.
а — концентрических; *б* — плоских.

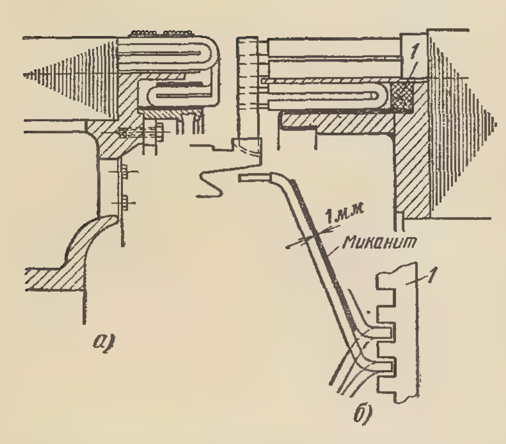


Рис. 3-32. Размещение уравнительных соединений в цилиндрической поверхности.
а — со стороны якоря, обратной по отношению к коллектору; *б* — со стороны коллектора.

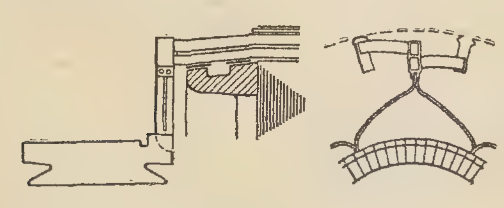


Рис. 3-33. Уравнительные соединения в петушках.

рис. 3-33 показана часть схемы петлевой обмотки с такими уравнителями [Л. 42].

3-9. ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК

Для машин постоянного тока общепромышленного применения выбирают изоляцию класса А и Е. В тех случаях, когда к машине предъявляются повышенные требования в отношении ее надежности, переходят к более нагревостойкой изоляции класса В и даже F. И только для специальных машин, работающих в особо тяжелых условиях, например в шахтах, берут изоляцию класса Н.

Изоляцию якорной обмотки можно подразделить следующим образом: 1) изоляция проводников и секционная; 2) пазовая изоляция; 3) изоляция лобовых частей; 4) изоляция для крепления обмотки. Несколько в стороне от изоляции обмотки стоит изоляция коллектора. Однако коллектор, составляя с обмоткой практически общий узел, в отношении выбора изоляции тесно связан с изоляционной конструкцией якоря.

В зависимости от состояния окружающей среды применяют различные исполнения изоляционной конструкции обмоток. При отсутствии повышенной влажности в окружающей атмосфере и химически вредных для изоляции газов применяются изоляционные конструкции обмоток нормального исполнения. При наличии повышенной влажности и химически вредных примесей в окружающей среде, а также в машинах, предназначенных для работы в тропиках, переходят к изоляционным конструкциям усиленно влагостойкого, или химически стойкого, или тропического исполнения.

В машинах постоянного тока мощностью 9 *квт* на 1 500 *об/мин* якоря имеют полузакрытые пазы со всыпной обмоткой. Применяемые

Таблица 3-2

Обмоточные провода для всыпных обмоток якорей машин постоянного тока мощностью 0,6—9 *квт*

Исполнение	Марки проводов при классе изоляции				
	A	E	B	F	H
Нормальное	ПБД ПЭЛШКО ПЭЛБО ПЭЛШО ПЭВ-2 ПЭВПИ-2 ПЭЛР-2	ПЭТВ ПСД ПСДТ	ПЭТВ ПСДТ ПСД	ПСД ПСДТ	ПСДК
Усиленно-влагостойкое и тропическое	ПЭВ-2 ПСД ПЭЛШКО ПСДТ	ПЭТВ ПСД ПСДТ	ПЭТВ ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСДК ПСДКТ
Химически стойкое	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСДКТ ПСДК

для обмоток таких машин марки круглых проводов указаны в табл. 3-2.

В приложении VI (табл. VI-1) приведена примерная спецификация пазовой изоляции с нагревостойкостью классов A, E, B и F нормального исполнения для всыпных обмоток якорей машин мощностью от 0,6 до 9 *квт* при напряжении до 500 *в*.

В табл. VI-2 приложения VI дается изоляция лобовых частей, подбандажная и вала якорей.

Якоря с изоляцией класов B, F и H могут быть применены для машин с защитой любого исполнения. Указанная в табл. VI-1 и VI-2 изоляция классов A и E пригодна только для якорей машин нормального исполнения; для машин в тропическом и химически стойком исполнениях даже при невысоких нагревах должна быть применена изоляция класса B.

Для машин мощностью от 10 до 200 *квт* с шаблонной обмоткой якоря, укладываемой в открытые пазы, применяются изолированные провода прямоугольного сечения в зависимости от класса нагревостойкости изоляции ПБД, ПСД, ПСДТ и ПСДК или голые провода из прямоугольной меди, изолируемые стеклолакотканью, микалентой или стекломикалентой (табл. 3-3).

Таблица 3-3

Витковая изоляция обмоток якоря машин постоянного тока мощностью 10—200 *квт* на напряжение до 500 *в*

Исполнение	Класс A		Классы E, B и F		Класс H	
	Марка провода	Дополнительная изоляция	Марка провода	Дополнительная изоляция	Марка провода	Дополнительная изоляция
Нормальное	ПБД		ПСД ПСДТ	Гибкий слюдинит толщиной 0,20 *мм* (классы E и B) Стекломикалента толщиной 0,17 *мм* (класс F)	ПСДК	Стекломикалента толщиной 0,17 *мм*
Усиленно-влагостойкое, химически стойкое и тропическое		Стекломикалента толщиной 0,17 *мм*	ПСД ПСДТ	Стекломикалента толщиной 0,17 *мм*	ПСДК	Стекломикалента толщиной 0,17 *мм*

Обмоточные провода со стекловолокнистой изоляцией марок ПСД, ПСДТ, ПСДТ обладают несколько пониженной механической прочностью, особенно при изгибе, истирании и ударах. Поэтому в местах выхода проводов из пазов и при больших длинах сердечника и пазовой части прибегают к дополнительным прокладкам из гибкого изоляционного материала (тонкий миканит, слюдинит, электрокартон и др.). В табл. 3-3 приведены указания о такой дополнительной изоляции.

В машинах с шаблонной обмоткой якоря меньшей мощности обмотка выполняется катушечной, в машинах большей мощности — стержневой. Пазовая часть катушечных обмоток до 500 *в* включительно с длиной сердечника якоря до 300 *мм* и при окружной скорости якоря до 60 *м/сек* изолируется мягкой гильзой из тонкого листового изоляционного материала.

Если пазовая часть обмотки имеет в длину более 300 *мм* или предназначается для работы при напряжении выше 500 *в*, то изоляция пазовой части выполняется в виде твердой гильзы или на катушку накладывается непрерывная изоляция.

Если якоря машин мощностью до 9 *квт* выполнены с открытыми пазами и секционной обмоткой, то изоляция корпусная и лобовых частей обмотки не отличается от изоляции якорей машин мощностью свыше 10 *квт*.

В табл. VI-4 приложения VI приведена спецификация по гильзовой и непрерывной изоляции обмоток якоря как для машин мощностью до 200 *квт* при напряжении до 500 *в* включительно, так и для более мощных машин при напряжении до 1 000 *в*.

Изолирование лобовых частей с твердой гильзой выполняется теми же материалами, что и для обмоток с мягкой гильзой; при напряжении свыше 500 до 1 000 *в* число слоев изоляционного материала в лобовой части увеличивается до трех.

В обмотках с непрерывной изоляцией пазовая и лобовая части изолированы одинаково.

В полузакрытых пазах обмотка закрепляется посредством клина. Крепление лобовых частей до последнего времени осуществлялось проволочными бандажами, прижимающими лобовые части к обмоткодержателям. Ширина подбандажной изоляции должна быть на 10—15 *мм* больше ширины бандажа.

Крепление обмотки при открытых пазах якоря производится проволочными бандажами или клиньями. Чтобы бандажи в части сердечника якоря не выступали за пределы наружного диаметра якоря, листы стали под бандажами штампуются меньшего диаметра. При больших диаметрах якоря закрепление обмотки в пазах производится с помощью клиньев. Во избежание ослабления и выпадения клиньев их следует изготовлять из малоусадочных материалов, как-то: бука, текстолита, стеклотекстолита или высокопрочных пластмасс.

В последнее время проволочные бандажи заменяются стеклобандажами из однонаправленных стеклянных нитей, пропитанных термореактивными смолами [Л. 30].

Так как механическая прочность стекловолокнистых бандажей составляет 90 вместо 140—150 *кГ/мм*^{2} для проволочных бандажей, то площадь сечения стекловолокнистого бандажа принимается обычно вдвое больше проволочного. При этом увеличение площади сечения стекловолокнистого бандажа не требует лишнего места вследствие исключения подбандажной изоляции.

Не рекомендуется ставить стекловолокнистые бандажи, если вылеты лобовых частей по сравнению с длиной сердечника якоря слишком велики.

3-10. РАЗМЕРЫ ОБМОТОК

Рассмотрим расчет вылета лобовой части якорной обмотки и средней длины ее полувитка.

Вначале определяем размеры поперечного сечения лобовой части якорной катушки. Они получаются как сумма сечений меди проводни-

ков и изоляции (см. § 3-8 и 3-9 и приложение VI). При этом должно быть учтено разбухание в лобовой части катушки при пропитке.

Величина разбухания может быть также принята на основании опытных данных равной по ширине

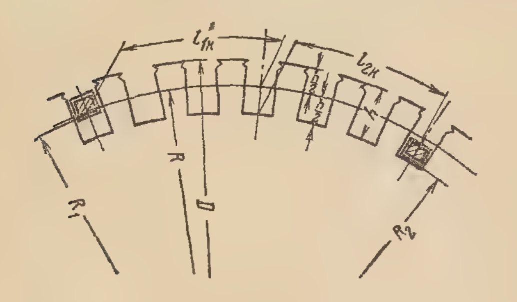


Рис. 3-34. К определению расстояния между сторонами якорной катушки.

0,05x+0,2 *мм*, по высоте 0,5y *мм*, где x — число проводников по ширине; y — число проводников по высоте катушки.

Расстояние между сторонами катушки равно длине дуги между двумя пазами, в которых должны быть уложены стороны катушки. Длина этой дуги равна (рис. 3-34):

$$l_к = \frac{2\pi R y_z}{Z}, \qquad (3\text{-}40)$$

где R — радиус дуги;
Z — число пазов якоря;
y_z — шаг по зубцам, равный числу зубцов, заключенных между сторонами катушки.

При приближенных подсчетах радиус R может быть взят как средний радиус катушки, т. е. радиус окружности, проходящей через середины пазов (рис. 3-34):

$$R = \frac{D - h_п}{2}, \qquad (3\text{-}41)$$

где $h_п$ — глубина паза;
D — диаметр якоря.

При более точных расчетах необходимо учесть, что одна сторона катушки лежит в верхней части паза, а другая — в нижней его части. Поэтому полная ширина катушки $l_к$ равна сумме дуг $l_{1к}$ и $l_{2к}$. Эти дуги лежат на окружностях разных радиусов R_1 и R_2 (см. рис. 3-34), которые легко определить, если известны размеры паза, изоляции и проводников, а также диаметр якоря D. Дуги $l_{1к}$ и $l_{2к}$ находятся следующим образом:

$$l_{1к} = \frac{2\pi R_1 y_z}{2Z}, \qquad (3\text{-}42)$$

$$l_{2к} = \frac{2\pi R_2 y_z}{2Z}. \qquad (3\text{-}43)$$

Полная ширина катушки равна:

$$l_к = l_{1к} + l_{2к}. \qquad (3\text{-}44)$$

Длина прямой части катушки всегда больше длины паза (осевой длины якоря), что видно из рис. 3-35, где l_1 — длина якоря; s — ширина нажимных пальцев (в осевом направлении якоря); t — длина, на которую пазовая часть катушки выступает за нажимные пальцы.

Удлинение пазовой части катушки на величину t нужно делать для того, чтобы отодвинуть от стали якоря лобовую часть, изоляция которой слабее изоляции пазовой части. Кроме того, по длине t получаются промежутки, сквозь которые будет проходить вентилирующий воздух и тем самым улучшать условия охлаждения якорной обмотки. Значение t берут по табл. 3-4 в зависимости от напряжения [Л. 69].

Следовательно, длина прямой части катушки равна:

$$l_a = l_1 + 2s + 2t. \qquad (3\text{-}45)$$

Размеры лобовой части катушки определим при помощи рис. 3-36. На этом рисунке обозначено:

α — угол наклона лобовой части;

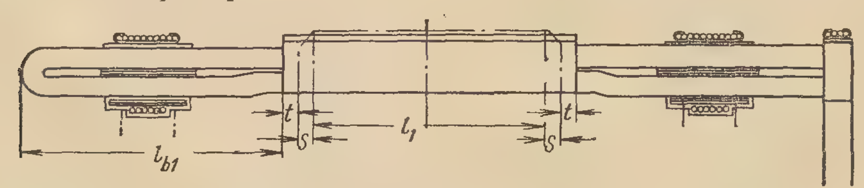


Рис. 3-35. К определению вылета и средней длины полувитка якорной катушки.

Таблица 3-4

Длина ($l+s$) прямой части катушки от торца сердечника до начала закругления лобовой части

Напряжение, *в*	До 250	550	750	1500	3000
$l+s$, *мм*	13	15	19	25	35

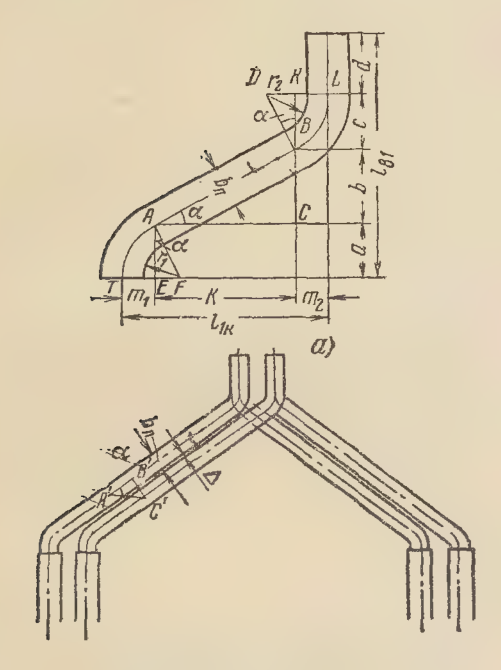


Рис. 3-36. К определению размеров лобовой части якорной катушки.

r_1 — радиус закругления при переходе от прямой к лобовой части катушки;

r_2 — радиус закругления при переходе к головке;

$l_{в1}$ — «вылет» лобовой части обмотки.

Из треугольника $A'B'C'$ (рис. 3-36, *б*) имеем:

$$\sin\alpha = \frac{\overline{B'C'}}{\overline{A'C'}}, \qquad (3\text{-}46)$$

где $\overline{B'C'} = \Delta + b_л$;

$\overline{A'C'} = \frac{2\pi R}{Z}$ — длина зубцового деления;

Δ — расстояние между лобовыми частями двух соседних катушечных сторон;

$b_л$ — ширина катушечной стороны в лобовой части;

R — радиус окружности, на которой расположена лобовая часть.

Следовательно,

$$\sin\alpha = \frac{(\Delta + b_л)\,Z}{2\pi R}. \qquad (3\text{-}47)$$

Для уменьшения вылета стремятся угол α сделать по возможности меньшим. Очевидно, что его величина при заданных $b_л$, Z и R зависит только от Δ. Следовательно, для уменьшения α нужно уменьшить Δ. Однако при выборе этой величины необходимо обеспечить возможность и удобство укладки лобовых частей. Выбирают Δ не меньше 0,4—1,0 *мм* (бо̀льшие значения берут при длинных лобовых частях, что соответствует малополюсным машинам относительно большой мощности).

Радиусы r_1 и r_2 берут в пределах 3—15 *мм* в зависимости от ширины катушечной стороны. Чем больше ширина катушечной стороны, тем она более жестка и тем бо̀льшими должны быть взяты радиусы закругления.

Вылет лобовой части

$$l_{в1} = a + b + c + d. \qquad (3\text{-}48)$$

Величина a определяется из треугольника AEF (рис. 3-36, *а*):

$$a = \overline{AE} = \overline{AF}\cos\alpha = \left(r_1 + \frac{b_л}{2}\right)\cos\alpha. \qquad (3\text{-}49)$$

Аналогично из треугольника BDK находим:

$$c = \overline{BK} = \left(r_2 + \frac{b_л}{2}\right)\cos\alpha. \qquad (3\text{-}50)$$

Величина b определяется из треугольника ABC:

$$b = \overline{BC} = \overline{AC}\,\mathrm{tg}\,\alpha = k\,\mathrm{tg}\,\alpha \qquad (3\text{-}51)$$

Здесь (рис. 3-36, *а*)

$$k = l_{1к} - m_1 - m_2, \qquad (3\text{-}52)$$

где

$$m_1 = \overline{TE} = \overline{TF} - \overline{EF} = \left(r_1 + \frac{b_л}{2}\right)(1 - \sin\alpha);$$

$$m_2 = \overline{KL} = \overline{DL} - \overline{DK} =$$
$$= \left(r_2 + \frac{b_л}{2}\right)(1 - \sin\alpha).$$

Подставив значения m_1 и m_2 в (3-52), получим:

$$k = l_{1к} - (r_1 + r_2 + b_л)(1 - \sin\alpha). \quad (3\text{-}53)$$

Подставив k в (3-51), получим:

$$b = [l_{1к} - (r_1 + r_2 + b_л) \times \times (1 - \sin\alpha)] \operatorname{tg}\alpha. \quad (3\text{-}54)$$

Величина d определяется из следующего равенства:

$$d = h_л + (3 \div 5),\ мм, \quad (3\text{-}55)$$

где $h_л$ — высота катушечной стороны в лобовой части.

Можно считать, что длины вылетов с обеих сторон якоря (со стороны коллектора и с противоположной стороны) одинаковы.

Здесь был указан метод определения вылета лобовой части для катушек, которые закладываются в открытые пазы. При всыпных и ручных обмотках, которые закладываются в полузакрытые пазы, вылет может быть определен только по эскизу с учетом расположения обмоткодержателей, если они имеются, и кривизны выгиба лобовых частей, а также их изоляции.

Средняя длина полувитка обмотки якоря может быть определена при помощи рис. 3-35 и 3-36. Она равна

$$l_{ср} = l_1 + l_л, \quad (3\text{-}56)$$

где $l_л$ — средняя длина лобовой части, в которую входят также длины t и s (см. рис. 3-35).

В соответствии с рис. 3-36 можно принять:

$$l_л = 2\left[t + s + \left(r_1 + \frac{b_л}{2}\right)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + \left(r_2 + \frac{b_л}{2}\right)\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + \frac{b}{\sin\alpha} + d\right]. \quad (3\text{-}57)$$

Здесь средняя длина катушечной головки принята равной $2d$.

Среднюю длину лобовой части всыпной обмотки, так же как и ее вылет, следует определять по эскизу обмотки. Приближенно для этой обмотки можно принять:

$$l_л \approx 1{,}4\,\tau. \quad (3\text{-}58)$$

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Якорными обмотками машин переменного тока будем называть обмотки, в которых при работе машин наводятся основные э. д. с. Поэтому к ним отнесем также обмотки статора и ротора асинхронных машин.

Рассматриваемые обмотки состоят из катушек, которые по аналогии с якорными обмотками машин постоянного тока можно назвать секциями, так как они имеют только два конца.

Катушки размещаются в пазах статора или ротора. Они могут состоять из одного или нескольких витков. В первом случае обычно применяются проводники относительно большого (прямоугольного) сечения. Поэтому обмотки с одним витком в секции иногда назывались стержневыми. В настоящее время стержневыми обмотками, так же как и для машин постоянного тока, принято называть обмотки, состоящие из полусекций.

Если в пазу помещается только одна катушечная (секционная) сторона, то получается однослойная обмотка. Обмотки выполняются также двухслойными по типу якорных обмоток машин постоянного тока с двумя катушечными (секционными) сторонами в пазу. В соответствии с этим различают два основных класса якорных обмоток машин переменного тока: *однослойные* и *двухслойные обмотки*.

Якорные обмотки машин переменного тока характеризуются следующими основными данными: число пазов Z, число полюсов $2p$, число параллельных ветвей фазы a, число фаз m, число последовательно соединенных витков фазы w, сопряжение фаз (при $m=3$ — треугольник или звезда), ширина катушки или секции (шаг обмотки y), число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2pm}.$$

Обычно для статоров (и роторов с контактными кольцами) асинхронных машин выбирают q, равное целому числу. Для статоров многополюсных синхронных машин, если $q<3$, в большинстве случаев выбирают q, равное дробному числу.

В ряде случаев обмотки выполняются с несколькими параллельными ветвями в каждой фазе. Возможное число параллельных ветвей определяется типом обмотки. Оно получается наибольшим при двухслойных обмотках, имеющих q, равное целому числу. При выборе числа параллельных ветвей нужно иметь в виду, что э. д. с. в ветвях должны быть равны по величине и совпадать по фазе и что активные сопротивления ветвей, а также их индуктивные сопротивления рассеяния должны быть практически одинаковыми.

Трехфазные обмотки в обычных случаях выполняются как *шестизонные*. В таких обмотках пазы, лежащие под одним полюсным делением (180 электрических градусов), разделяются на три части, по одной на каждую фазу, что дает шесть фазных зон на два полюса. При q=целое число и $y=\tau$ каждая зона шестизонной обмотки занимает 60 *эл. град.*

В специальных случаях (например, для двухскоростных машин, см. § 13-8) применяются также *трехзонные* обмотки. Здесь пазы, лежащие под двумя полюсами, разделяются на три части, что дает три фазные зоны на два полюса и соответственно 120 электрических градусов на зону. В данной главе рассматриваются шестизонные обмотки.

4-2. ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Однослойные обмотки различаются по выполнению катушек, катушечных групп, размещению лобовых частей. Если катушки имеют различную ширину, то получаются «концентрические» обмотки. Они так названы потому, что катушки,

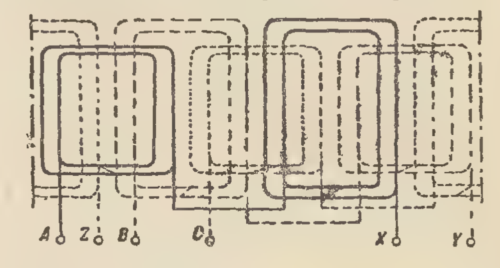


Рис. 4-1. Однослойная двухплоскостная обмотка.

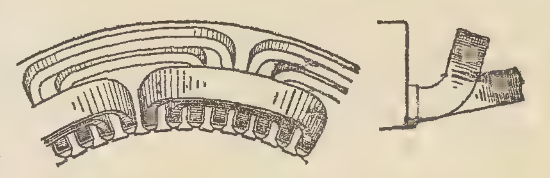


Рис. 4-2. Лобовые части однослойной двухплоскостной обмотки.

составляющие катушечную группу, охватывают одна другую. Эти обмотки имеют лобовые части, расположенные в двух или трех «плоскостях» (или «ярусах»). В соответствии с расположением лобовых частей различают двухплоскостные и трехплоскостные (или двухъярусные и трехъярусные) обмотки.

На рис. 4-1 показана схема двухплоскостной обмотки при $2p=4$; $q=2$. На рис. 4-2 показано расположение лобовых частей такой обмотки.

На рисунках видно, что двухплоскостная обмотка состоит из mp катушечных групп по q катушек в каждой, причем если p — четное число, одна половина ($^1/_2\ mp$) катушечных групп имеет лобовые части в одной плоскости, а другая — в другой плоскости; при p, равном нечетному числу, одну катушечную

группу приходится составлять из катушек, имеющих изогнутые лобовые части.

Трехплоскостные обмотки применяются обычно для двухполюсных машин, так как применение для

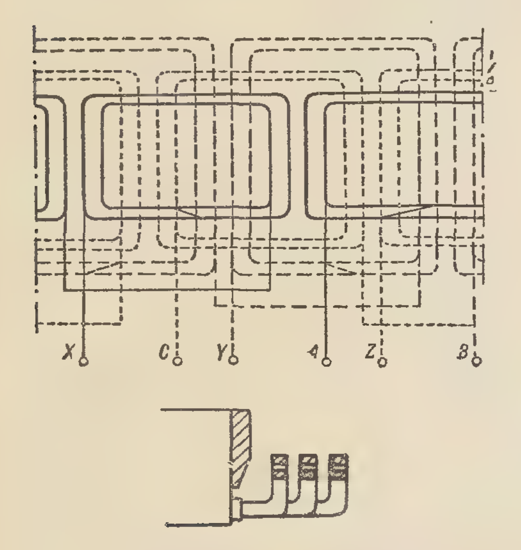


Рис. 4-3. Однослойная трехплоскостная обмотка.

них двухплоскостных обмоток создавало бы большие затруднения при размещении их лобовых частей. На рис. 4-3 представлена схема трехплоскостной обмотки при $2p=2$; $q=4$ (внизу показано размещение лобовых частей обмотки).

Если катушки имеют одинаковые ширину и форму, то получаются однослойные симметричные обмотки, называемые также шаблонными или равнокатушечными. Их можно разделить на следующие типы: 1) простая шаблонная обмотка; 2) шаблонная обмотка «вразвалку»; 3) цепная обмотка.

Для удобства изготовления катушкам шаблонных обмоток обычно придается форма трапеции.

На рис. 4-4 представлена схема простой шаблонной обмотки при $2p=2$; $q=3$, $Z=18$, а на рис. 4-5 — схема шаблонной обмотки «вразвалку» при $2p=2$; $q=4$, $Z=24$.

Концентрические двухплоскостные и трехплоскостные обмотки (см. рис. 4-2 и 4-3) ранее применялись довольно часто. Они изготовлялись обычно вручную путем «протяжки» провода через паз вдоль оси машины при использовании простых шаблонов только для укладки лобовых частей, что требовало много времени.

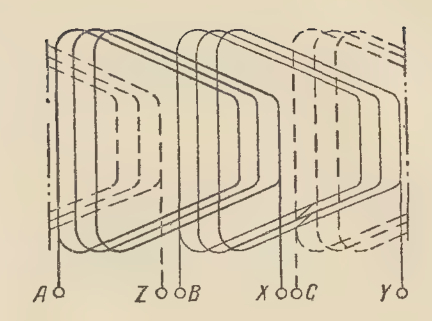


Рис. 4-4. Схема простой шаблонной обмотки.

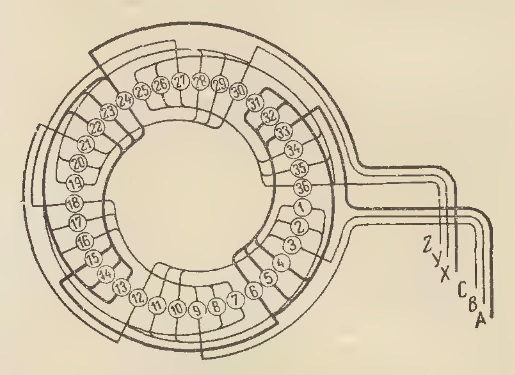


Рис. 4-4а. Схема однослойной шаблонной обмотки с концентрическими катушками. ($2p=4$; $q=3$; $a_1=1$).



Рис. 4-4б. Укладка в пазы однослойной шаблонной обмотки с концентрическими катушками ($2p=8$; $q=3$).

В последние годы для асинхронных машин небольшой мощности (примерно до 10 *квт* при $2p=4$) применяются однослойные обмотки в виде представленных на рис. 4-4

и 4-5, но в таких обмотках катушечные группы (рис. 4-4) или полугруппы (рис. 4-5) составляются из неодинаковых по ширине катушек, концентрически расположенных

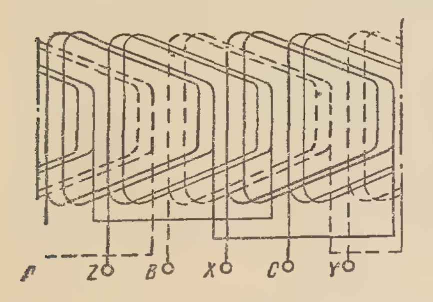


Рис. 4-5. Схема шаблонной обмотки «вразвалку».

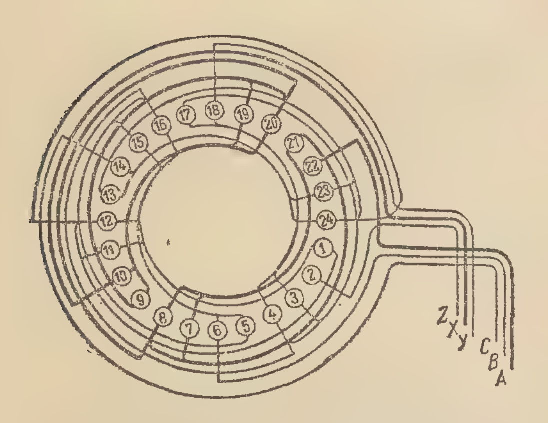


Рис. 4-5а. Схема однослойной шаблонной обмотки «вразвалку» с концентрическими катушками. ($2p=2$; $q=4$; $a_1=1$).

(рис. 4-4а, 4-4б и 4-5а); при этом уменьшается число перекрещиваний лобовых частей катушек. Катушки этих обмоток наматываются на специальных шаблонах в виде полной группы или полугруппы, а затем закладываются в пазы, как при изготовлении «всыпной» обмотки.

Все рассмотренные в предыдущем обмотки должны быть отнесены к диаметральным, для которых обмоточный коэффициент укорочения равен единице, так как неодинаковые по ширине катушки, составляющие группу или две полугруппы, могут быть при определении обмоточного коэффициента заменены одинаковыми катушками шириной τ при сдвиге между ними π/mq электрических радианов.

Цепные обмотки также выполняются «вразвалку», но здесь короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. «развалка» производится не по полугруппам, а по катушкам. Цепные обмотки позволяют получить несколько более компактную укладку лобовых частей, чем другие шаблонные обмотки.

На рис. 4-6 представлена схема цепной обмотки при нечетном числе пазов на полюс и фазу — $q=3$. Из схемы видно, что шаг обмотки, равный числу зубцов, охватываемых катушкой, должен быть всегда равен нечетному числу, так как если длинные стороны катушек занимают пазы с нечетными (четными) номерами, то короткие стороны катушек должны занимать пазы с четными (нечетными) номерами.

Наибольшее число параллельных ветвей цепной обмотки при q, равном нечетному числу, равно числу пар полюсов.

Шаг обмотки, изображенной на рис. 4-6, равен полюсному делению ($y=\tau=9$), поэтому данная обмотка является диаметральной. Но она может быть выполнена и с укороченным шагом, примером чего может служить обмотка, схема которой показана на рис. 4-7. Здесь шаг взят равным 7 ($y=7$; $\beta=y/\tau=0{,}78$).

На рис. 4-8 представлена схема цепной обмотки при q, равном четному числу ($q=2$). Так как шаг цепной обмотки всегда должен быть выражен нечетным числом, то здесь он не может быть взят равным τ; для данной обмотки он взят равным $\tau-1=5$.

Наибольшее число параллельных ветвей цепной обмотки при q, равном четному числу, равно числу полюсов.

На рис. 4-9 показана укладка лобовых частей цепной обмотки.

Если цепная обмотка при q, равном четному числу, имеет шаг $y=\tau-1$, то ее коэффициент укорочения принимается равным единице. Эта обмотка, как и при q, равном нечетному числу, может быть выполнена с укороченным шагом; $y<\tau-1$. Цепных обмоток с укороченным шагом при q, равном нечетному числу, следует по возможности

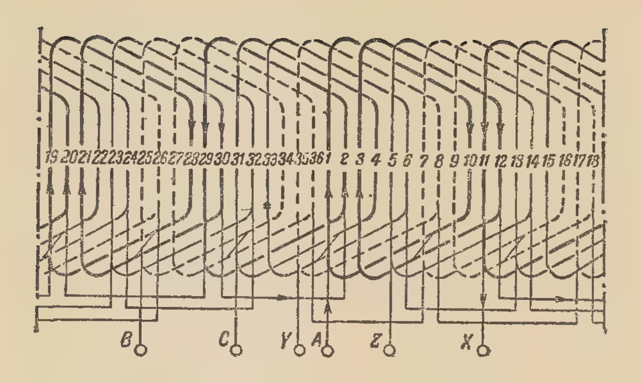


Рис. 4-6. Схема цепной обмотки при $2p=4$; $q=3$; $y=\tau=9$.

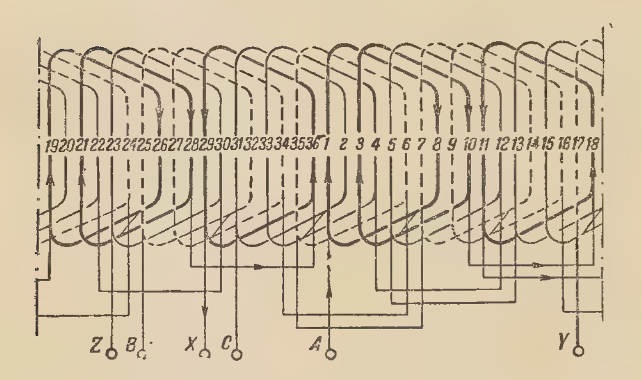


Рис. 4-7. Схема цепной обмотки при $2p=4$; $q=3$; $y=\frac{7}{9}\tau$.

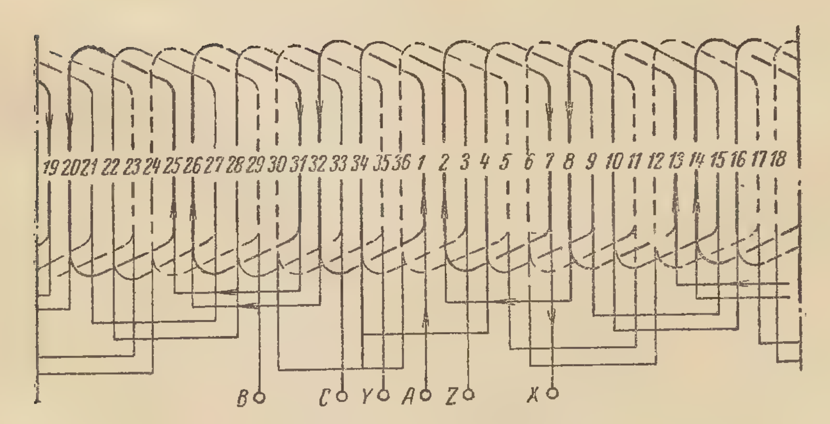


Рис. 4-8. Схема цепной обмотки при $2p=6$; $q=2$; $y=5$.

избегать, так как в таких обмотках получаются «несплошные» фазные зоны (см. рис. 4-7), при которых кривая поля оказывается несимметричной относительно оси абсцисс. При $y<\tau-1$ и q, равном четному числу, также получаются «несплошные» фазные зоны, но кривая поля здесь симметрична относительно оси абсцисс.

В последние годы цепные обмотки применяются редко.

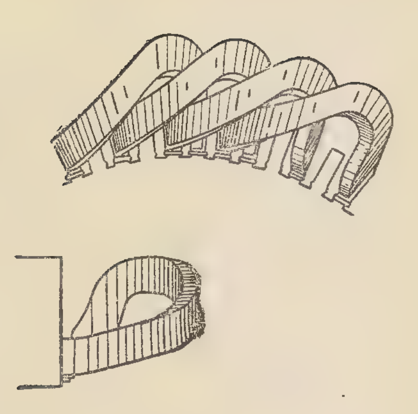


Рис. 4-9. Лобовые части цепной обмотки.

4-3. ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Для машин переменного тока в настоящее время наиболее часто применяются двухслойные обмотки. Основными достоинствами, обусловившими их преимущественное применение, являются следующие:

1) возможность выбора благоприятного шага (ширины секции), что ведет к улучшению формы кривой э. д. с. и поля, уменьшению рассеяния и добавочных потерь;

2) пониженная стоимость вследствие уменьшения расхода меди и изоляционных материалов и большей механизации в изготовлении;

3) сравнительно легкий выбор числа витков фазы, при котором сохраняется благоприятное соотношение между B_δ и A.

Кроме того, отметим, что при двухслойной обмотке предоставляется большая возможность выбора дробного числа пазов на полюс и фазу. Это обстоятельство имеет существенное значение для многополюсных синхронных машин большой мощности, для которых особенно важно получение более близкой к синусоиде кривой э. д. с.

Двухслойные обмотки переменного тока подразделяются на петлевые и волновые, причем как те, так и другие могут быть выполнены с целым или дробным числом q.

а) **Петлевые обмотки при q, равном целому числу.** Петлевые двухслойные обмотки можно рассматривать как обмотки, полученные из простых петлевых обмоток постоянного тока, имеющих в пазу только две секционные стороны.

На рис 4-10, *а* показано, каким образом получается трехфазная обмотка из обмотки постоянного тока. Мы видим, что каждая пара параллельных ветвей исходной обмотки должна быть разделена на шесть частей. Следовательно, в общем случае получается $6p$ частей, так как для простой петлевой обмотки постоянного тока $p=a$*. Эти части обмотки, называемые в дальнейшем катушечными группами, состоят при

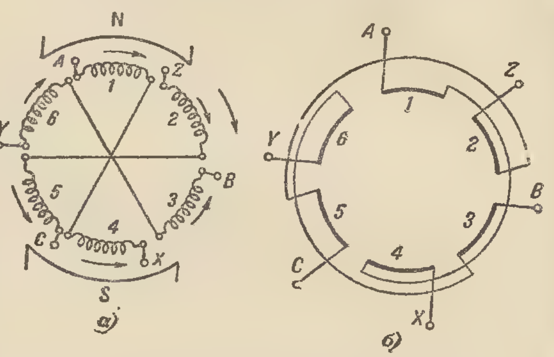


Рис. 4-10. Получение трехфазной обмотки из обмотки якоря машины постоянного тока.

q, равном целому числу, из $q=Z/6p$ катушек (секций), так как общее число катушек, поскольку в пазу лежат две катушечные стороны, равно числу пазов Z.

На рис. 4-10, *б* приведена условная схема двухполюсной обмотки, показывающая, как должны быть соединены катушечные группы каждой фазы при их последовательном включении.

На рис. 4-11 представлены условная схема и схема-развертка петлевой двухслойной обмотки, имеющей $Z=24$; $2p=4$; $m=3$ и $6p=12$ катушечных групп по две ($q=2$) катушки в каждой, причем шаг обмотки здесь выбран $y=5$.

Шаг обмотки обычно выбирается равным точно или приблизитель-

* В теории обмоток машин постоянного тока принято через a обозначать число пар параллельных ветвей, в теории же обмоток машин переменного тока через a обозначают число параллельных ветвей фазы. Мы сохранили эти не совсем удачные, но общепринятые обозначения.

но $^5/_6$ полюсного деления $\left(y \approx \frac{5}{6}\tau\right)$, так как в этом случае амплитуды, главным образом амплитуды 5-й и 7-й гармоник, в кривых поля и э. д. с. значительно снижаются.

При выполнении обмотки в пазы закладывается Z катушек надлежащих размеров и формы, заранее

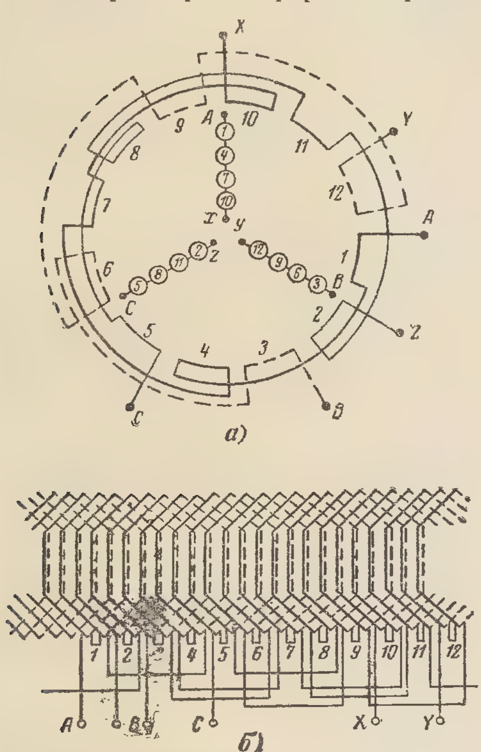


Рис. 4-11. Схема трехфазной петлевой двухслойной обмотки при $Z=24$; $2p=4$; $q=2$; $y=5$.

а — условная схема; *б* — схема-развертка (цифрами обозначены номера катушечных групп).

заготовленных. Затем делаются междукатушечные соединения таким образом, чтобы получилось $Z/q=3 \cdot 2p$ катушечных групп (для машин при «всыпной» обмотке катушки обычно закладываются целыми группами, поэтому здесь не приходится делать междукатушечных соединений). После этого выполняются междугрупповые соединения, т. е. соединяются между собой группы, составляющие фазы обмотки.

На рис. 4-11 показано последовательное соединение катушечных групп в каждой фазе; например, для фазы A катушечные группы *1, 4, 7* и *10* соединены последовательно.

Общее число групп, приходящихся на фазу в трехфазной двухслойной обмотке, равно $2p$. Если q равно целому числу, то все эти группы могут быть соединены параллельно; следовательно, наибольшее число параллельных ветвей в данном случае равно $2p$. Меньшее число параллельных ветвей получается при последовательно-параллельном соединении катушечных групп. Это

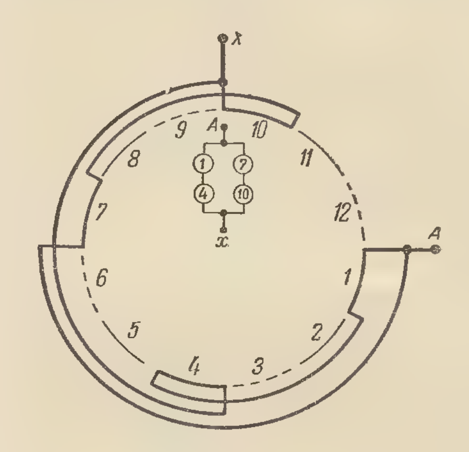


Рис. 4-12. Образование двух параллельных ветвей при $2p=4$.

соединение рекомендуется выполнять таким образом, чтобы параллельные ветви следовали одна за другой по окружности статора. Например, при образовании двух параллельных ветвей на фазу в рассмотренной обмотке (рис. 4-11) следует для фазы A в одну параллельную ветвь включить группы *1* и *4*, а в другую — группы *7* и *10* (рис. 4-12); аналогично следует выполнить соединения для фаз B и C. При таком соединении в случае эксцентричного положения ротора относительно статора в параллельных ветвях будут возникать уравнительные токи, что приведет к выравниванию магнитных потоков и ослаблению одностороннего магнитного притяжения. Магнитная неуравновешенность особенно нежелательна в асинхронных двигателях. Однако большинство асинхронных двигате-

лей имеет короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки, которая весьма эффективно действует в отношении выравнивания потоков отдельных магнитных цепей.

б) **Петлевые обмотки при q, равном дробному числу.** При дробном числе q пазов на полюс и фазу общее число пазов Z, число фаз m и число полюсов $2p$ должны быть связаны определенными соотношениями, чтобы получилась симметричная обмотка, т. е. обмотка, э. д. с. фаз которой равны и сдвинуты по фазе на один и тот же угол $360/m$ градусов.

Условия образования обмотки при q, равном дробному числу, можно уяснить, если обратиться к векторной диаграмме э. д. с., наведенных в катушечных сторонах, причем для двухслойной обмотки достаточно взять катушечные стороны верхнего или нижнего слоя. Векторы э. д. с. должны быть отложены из одного центра. В этом случае получается так называемая звезда пазовых э. д. с., векторы которой сдвинуты один относительно другого на угол $\alpha = \frac{p \cdot 360}{Z}$ градусов, соответствующий сдвигу в электрических градусах между соседними пазами.

Общее число векторов звезды равно Z, но если Z и p имеют общий наибольший делитель t, то число лучей звезды равно Z/t; при этом каждый луч состоит из t равных векторов.

Для получения симметричной обмотки необходимо иметь:

$$\frac{Z}{tm} = \text{целое число}. \quad (4\text{-}1)$$

Это условие в то же время является и достаточным для двухслойной обмотки[1].

Исследование обмотки при q, равном дробному числу, показывает, что не при всяком q может быть получена симметричная обмотка.

[1] Для однослойной обмотки необходимо, кроме того, иметь $Z/2m$ равным целому числу, так как для этой обмотки число катушек равно $Z/2$.

Если q представить в виде смешанного числа или обыкновенной дроби:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d} = \frac{N}{d}, \quad (4\text{-}2)$$

где c/d и N/d — несократимые дроби, то можно будет показать, что при d, кратном трем, трехфазная обмотка не может быть симметричной ни для какого числа полюсов, а для $p=3$, например, может быть осуществлена симметричная трехфазная обмотка только при $d=2$.

Из (4-2) следует, что для получения дробного q нужно взять N соседних катушек и образовать из них d катушечных групп, причем каждая из них должна иметь, очевидно, целое число катушек (q рассматривается как среднее число).

Пусть из d катушечных групп x групп имеют по b катушек и y групп по $(b+1)$ катушек; тогда $bd+c = xb+y(b+1)$. Разделив последнее равенство на b, получим: $d + \frac{c}{b} = x + y + \frac{y}{b}$; так как $d=x+y$, то $\frac{c}{b} = \frac{y}{b}$, а отсюда $y=c$ и $x=d-c$.

Следовательно, из d катушечных групп, образованных из N соседних катушек, $(d-c)$ групп должны иметь по b катушек, а c групп по $(b+1)$ катушек.

Первые группы назовем малыми, а вторые — большими. Чередование их должно происходить в определенном порядке, чтобы получился наибольший коэффициент распределения для первых гармоник э. д. с. и н. с.

Возьмем для примера $q=2\frac{2}{5}$; тогда $N=bd+c=2\cdot5+2=12$. Следовательно, из 12 соседних катушек нужно образовать пять групп: три группы по две катушки и две группы по три катушки; то же самое нужно сделать со следующими 12 катушками и т. д. Число таких повторяющихся одинаковых чередований, каждое из которых состоит в общем случае из d групп, образованных из N катушек, должно быть целым:

$$\frac{Z}{N}=\frac{2pmq}{N}=\frac{2pm}{d}=\text{целое число}, \quad (4\text{-}3)$$

где $2pm$ — общее число катушечных групп всей обмотки;

$2p$ — число катушечных групп одной фазы; очевидно, что $\frac{2p}{d}$ = целое число, (4-4)

т. е. каждая фаза должна иметь $2p/d$ повторяющихся одинаковых частей.

Порядок следования больших и малых групп в одном чередовании легко устанавливается, если в дроби c/d $c=1$ или $d-c=1$. Например, при $q=2\frac{1}{4}$ получаем порядок следования 4 групп ($d=4$) с двумя и тремя катушками: 2 2 2 3; при $q=2\frac{3}{4}$ имеем: 2 3 3 3. Чтобы удовлетворить условию (4-4), необходимо для любого из приведенных примеров иметь число полюсов $2p$, кратное $d=4$. Возьмем $2p=4$; при этом мы должны найденное чередование повторить 3 раза (для $m=3$); тогда при $q=2\frac{3}{4}$ получим:

A	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*
2	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)

Здесь над чередующимися катушечными группами написаны буквы *A*, *C*, *B*, чтобы показать, к каким фазам относятся эти группы; внизу (в скобках) указаны номера следующих друг за другом групп в соответствии с условной схемой на рис. 4-11, *а*. Соединения катушечных групп для получения трехфазной обмотки должны производиться так же, как и при q, равном целому числу, согласно рис. 4-11, *а*.

Очевидно, что при круговом перемещении номеров групп в любую сторону все три фазы всегда будут иметь одинаковое число больших и малых групп.

Если бы в рассмотренном примере при том же $q=2\frac{3}{4}$ число полюсов было равно 8, 12, 16 и т. д., то мы получили бы число повторяющихся частей, состоящих из трех чередований, равным 2, 3, 4 и т. д. (в общем случае $2p/d$ повторяющихся частей). Наибольшее число параллельных ветвей в фазе обмотки равно $2p/d$.

Если требуется получить в фазе обмотки a параллельных ветвей, то необходимо иметь $2p/da$, равным целому числу.

Распределение пазов, а следовательно, катушек и катушечных групп по фазам можно произвести при помощи звезды пазовых э. д. с. Но для этого можно применить и более простые способы. Рассмотрим здесь два из них.

Первый заключается в следующем. На клетчатой бумаге составляется таблица с числом строк, равным d полюсам, и числом клеток в строке, равным $3N$ (при $m=3$); таблица разделяется на три одинаковых по ширине столбца (в каждом N клеток по горизонтали); затем в клетки вписываются в последовательном порядке номера пазов с шагом между ними, равным d клеткам; номера пазов в столбцах соответствуют катушкам, входящим в отдельные фазы[1].

Рассмотрим для примера двухслойную петлевую обмотку, имеющую $Z=84$; $2p=20$; $m=3$; $q=1\frac{2}{5}=\frac{7}{5}$. Обмотка будет симметричной, так как $\frac{d}{m}\left(=\frac{5}{3}\right)$ = дробное число, а $\frac{2p}{d}\left(=\frac{20}{5}\right)$ = целое число; при этом условие (4-1) также удовлетворяется: $\frac{Z}{tm}=\frac{84}{2\cdot 3}=14$.

Составляем табл. 4-1 для данной обмотки согласно приведенным указаниям.

[1] Способ может быть обоснован путем сопоставления таблицы и соответствующей звезды пазовых э. д. с.

Таблица 4-1

Полюсы	Фаза																				
	A							*C*							*B*						
N	1					2					3					4					5
S					6					7					8					9	
N				10					11					12					13		
S			14					15					16					17			
N		18					19					20					21				

Из таблицы находим группировку катушек по фазам, а также чередование больших и малых катушечных групп:

A	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*
2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)

Полученная часть обмотки будет повторяться $\frac{2p}{d} = \frac{20}{5} = 4$ раза. Повторяющаяся часть обмотки охватывает d полюсов.

При выполнении обмотки в пазы должно быть заложено 84 катушки, ширину которых выбираем равной $y=4$. Далее нужно выполнить междукатушечные соединения, чтобы получилось $2pm=20\cdot 3=60$ групп при найденном чередовании больших и малых групп. Пронумеровав в последовательном порядке все группы, можем теперь выполнить междугрупповые соединения согласно соответствующей условной схеме. Последняя будет иметь 60 малых дуг, обозначающих условно катушечные группы, с номерами в последовательном порядке от 1 до 60.

Так как обмотка имеет четыре повторяющиеся части, то она может быть выполнена с двумя или четырьмя параллельными ветвями в каждой фазе.

При втором способе, который также основан на применении звезды пазовых э. д. с. [Л. 44], порядок следования больших и малых групп в одном чередовании устанавливается следующим образом:

а) напишем ряд чисел $1\times q$, $2\times\times q$, $3\times q, \ldots$ до $d\times q$;

б) отбросим дробные части полученных чисел, прибавим 1 к их целым частям, а последнее число оставим без изменения;

в) поставим 0 (нуль) слева второго ряда (б) и определим разность между его соседними числами.

Последний ряд показывает порядок следования больших и малых групп в одном чередовании, составляющем одну треть повторяющейся части обмотки. Для двух других третей группировка катушек будет такой же, как для первой трети, т. е. для определения всей повторяющейся части обмотки при $m=3$ чередование, полученное в ряде (в), должно быть повторено 3 раза.

Для примера возьмем обмотку при $Z=108$; $2p=14$ и $m=3$; для этой обмотки

$$q = \frac{108}{14\cdot 3} = \frac{18}{7} = 2\frac{4}{7}.$$

Следовательно, по второму способу находим:

(а)		$2\frac{4}{7}$		$5\frac{1}{7}$		$7\frac{5}{7}$		$10\frac{2}{7}$		$12\frac{6}{7}$		$15\frac{3}{7}$		18
(б)	0	3		6		8		11		13		16		18
(в)	3		3		2		3		2		3		2	
Фазы	*A*		*C*		*B*		*A*		*C*		*B*		*A*	
№ групп	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)	

Обмотка имеет 108 катушек, из которых должны быть образованы $2\ pm=14\cdot3=42$ катушечные группы, причем чередование больших и малых групп должно соответствовать ряду (в). Это чередование нужно повторить 3 раза, чтобы получить повторяющуюся часть обмотки. Число таких повторяющихся частей в обмотке равно $\frac{2p}{d}=\frac{14}{7}=2$; следовательно, фазы могут иметь только по две параллельные ветви.

Мы отметили, что при $d/3$, равном целому числу, трехфазная обмотка получается несимметричной. В этом можно убедиться, рассматривая чередование больших и малых групп, например, при $d=3$. В чередовании мы будем иметь или одну большую и две малые группы, или две большие и одну малую. Так как фазы составляются из групп, имеющих для первой фазы номера 1, 4, 7, 10 и т. д., для второй фазы 3, 6, 9, 12 и т. д. и для третьей фазы 5, 8, 11, 14 и т. д., то в одну из фаз попадут только одни большие группы, а в какую-либо из двух других — только одни малые, что и приводит к несимметрии фаз. К тому же самому мы придем, если $d=6$; 9 и т. д.

Как отмечалось, несимметричные трехфазные обмотки получаются, если $d/3$ равно целому числу и если число пазов Z не делится на число фаз $m=3$. В таких обмотках э. д. с. фаз различаются по величине и сдвиг между ними по фазе не равен 120°.

Так как получающаяся несимметрия вызывает вибрации и шум машины, а также неравномерное распределение токов по фазам, что ведет к увеличению электрических потерь в обмотке и повышению ее нагревания, то, как правило, избегают применять несимметричные обмотки, особенно для асинхронных машин. Однако в отдельных случаях, когда, например, требуется изменить число полюсов машины или при мелкосерийном производстве машин желательно ради экономии уменьшить количество штампов, они могут найти применение.

Исследования показывают [Л. 44—46], что во многих случаях несимметрия фаз обмотки, если они соединяются в звезду, получается практически допустимой (различие э. д. с. по величине не превышает 2—3%, а их сдвиг по фазе отличается от 120° не больше, чем на 2—3°).

Составление схем обмоток может быть выполнено при помощи звезды пазовых э. д. с., но могут быть также применены более простые способы, аналогичные ранее приведенным для симметричных обмоток [Л. 44].

Приведенные ранее схемы однослойных цепных обмоток можно рассматривать как полученные из схем двухслойных петлевых обмоток. При этом исходная двухслойная петлевая обмотка должна иметь $q_д$, равное $\frac{1}{2}q_ц$ цепной обмотки. Из схемы такой обмотки получим схему цепной обмотки, если увеличим число пазов вдвое и нижние катушечные стороны вынесем в соседние добавочные пазы. Отсюда можно также видеть, что при шаге двухслойной обмотки $y_д$ шаг цепной обмотки $y_ц=2y_д-1$; следовательно, всегда $y_ц$ — нечетное число.

в) **Волновые обмотки при q, равном целому числу.** Волновые двухслойные обмотки для статоров применяются в случае машин большой мощности, таких, например, как большие тихоходные гидрогенераторы, где они дают существенные выгоды по сравнению с петлевыми двухслойными за счет уменьшения большого количества тяжелых междугрупповых соединений [Л. 45 и 46]. Но в этом случае они обычно имеют q, равное дробному числу.

Основное применение волновые обмотки находят для роторов асинхронных машин с контактными кольцами. Такие обмотки часто называют волновыми роторными обмотками. Они обычно выполняются при q, равном целому числу, с двумя стержнями в пазу, расположенными в два слоя.

На рис. 4-13 представлена схема волновой роторной обмотки при $Z=36$; $2p=4$; $q=3$. Здесь следует различать шаги: задний y_1, определяющий ширину витка, и передний y_2 со стороны выводов. При q, равном целому числу, шаг y_1 всегда берется равным полюсному делению $\tau=3q$; шаг y_2 также берется равным τ, и только в конце обхода по окружности ротора приходится брать его равным $\tau-1$ или $\tau+1$. В первом случае получается обмотка с укороченным шагом в конце обхода (с укороченным переходом), а во втором случае — с удлиненным шагом в конце обхода (с удлиненным переходом). Наиболее часто применяется обмотка, соответствующая первому случаю. Обмотка с удлиненным шагом в конце обхода (по окружности ротора) применяет-

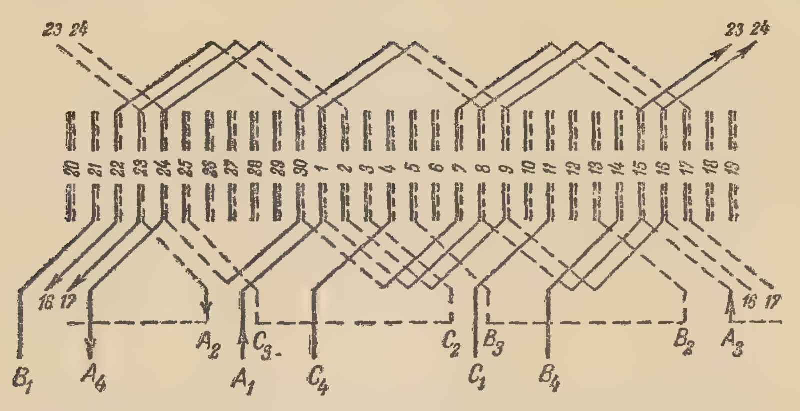


Рис. 4-13. Волновая роторная обмотка при $Z=36$; $2p=4$; $q=3$ (с укороченным шагом в конце обходов по окружности ротора в обоих направлениях).

ся редко, так как она требует несколько большего расхода меди и изоляционных материалов из-за более длинных лобовых частей со стороны выводов[1].

На рис. 4-13 видно, что при выполнении соединений для одной фазы обмотки нужно q раз обойти окружность ротора в одном направлении (от A_1 по часовой стрелке до A_2) и затем q раз в другом направлении (от A_3 против часовой стрелки до A_4). Таким образом, получаются две части с равными по величине и фазе э. д. с. На рис. 4-13 показано последовательное включение этих частей. Соединение A_2—A_3 называется поворотным соединением. За начало фазы принят зажим A_1, а за конец фазы — зажим A_4.

Схемы для фаз B и C аналогичны схеме для фазы A. На рис. 4-13 для фаз B и C показаны только их начала (B_1 и C_1), концы (B_4 и C_4) и поворотные соединения (B_2—B_3 и C_2—C_3). Начала фаз взяты сдвинутыми на 120 геометрических градусов, что всегда можно сделать, если число пар полюсов p не делится на три. В этом случае начала и концы фаз, а также поворотные соединения оказываются симметрично расположенными по окружности ротора, вследствие чего сохраняется его статическая уравновешенность и, кроме того, облегчается выполнение обмотки.

Если $\frac{p}{3}=g=$ целое число, то брать начала фаз сдвинутыми на 120 геометрических градусов нельзя, так как при этом они окажутся сдвинутыми на $g \cdot 360$ электрических градусов. Но и в этом случае целесообразно начала фаз сдвинуть одно относительно другого не на 120, а на $k \cdot 120$ электрических градусов, подбирая целое число k, не кратное трем, таким образом, чтобы расположение начал, концов и поворотных соединений фаз было возможно более близким к симметричному.

Можно было бы вместо поворотного соединения между точками A_2 и A_3 сделать поворотное соединение между точками A_4 и A_1. Тогда начало фазы будет в точке A_3, а конец ее — в точке A_2. Аналогичные изменения при этом должны быть сделаны и для фаз B и C. В этом случае начала и концы фаз мы получили бы от нижних стержней, а поворотные соединения — между верхними стержнями. Такое выполнение обмотки в большинстве случаев менее удобно, чем рассмотренное ранее, поэтому обычно обмотка выполняется по схеме на рис. 4-13.

Волновая роторная обмотка может быть выполнена также по схе-

[1] Некоторые заводы все же выполняют (обычно для быстроходных машин при p, равном 2 и 3) роторные обмотки и с удлиненным переходом, так как ремонт таких обмоток при использовании тех же стержней ротора, когда приходится заново их изолировать, облегчается при переходе к обмотке с укороченным переходом.

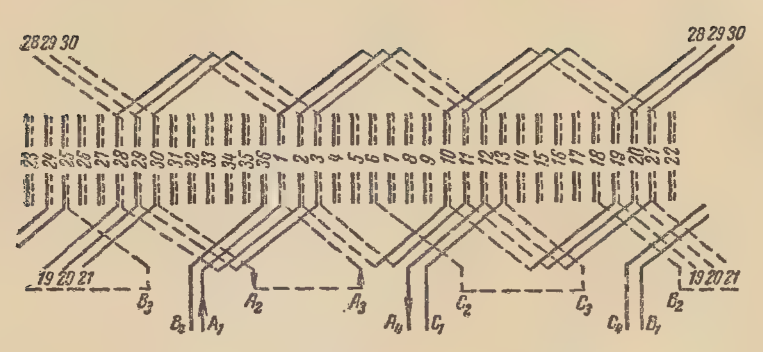


Рис. 4-14. Волновая роторная обмотка при $Z=36$; $2p=4$; $q=3$ (с удлиненным шагом в конце обходов по часовой стрелке и с укороченным шагом в конце обходов против часовой стрелки).

ме, представленной на рис. 4-14. Здесь шаги в конце обходов по часовой стрелке взяты удлиненные, а те же шаги в обратном направлении — укороченные. При этом мы не будем иметь пересечений поворотных соединений с выводами от обмотки, что в некоторых случаях может оказаться более удобным, чем при выполнении обмотки по схеме на рис. 4-13.

а)

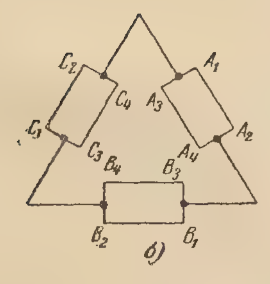


Рис. 4-15. Схема соединений частей фаз при двух параллельных ветвях в каждой фазе.

а — соединение Y; *б* — соединение Δ.

Мы отметили, что каждая фаза рассмотренных обмоток состоит из двух одинаковых частей, которые на схемах рис. 4-13 и 4-14 соединены последовательно при помощи поворотных соединений (последние на заводах называются также «перемычками». Для получения двух параллельных ветвей в каждой фазе можно обе их части соединить параллельно, как схематически показано на рис. 4-15. Такие соединения можно получить только при q, равном целому числу.

Наибольшее число параллельных ветвей волновой двухслойной обмотки при q, равном целому числу, равно $2p$. Схема в этом случае выполняется, как показано на рис. 4-16 для фазы A; для двух других фаз (B и C) схемы выполняются аналогично.

На некоторых заводах Советского Союза в последние годы для роторов с контактными кольцами применяется двухслойная волновая обмотка, имеющая по сравнению с рассмотренными более простую схему [Л. 48]. С технологической стороны она имеет существенные преимущества, что можно видеть на рис. 4-17, где представлена схема этой упрощенной обмотки. Она не требует особых поворотных соединений (перемычек). Поворот здесь осуществляется для каждой фазы при помощи косо расположенного стержня (рис. 4-18). Паз с косым стержнем должен быть сдвинут относительно паза, где помещается начальный стержень фазы, на $\left(\frac{2Z}{3p}-1\right)$ пазов в обратном направлении хода обмотки. Для фазы A (рис. 4-17) косой стержень будет

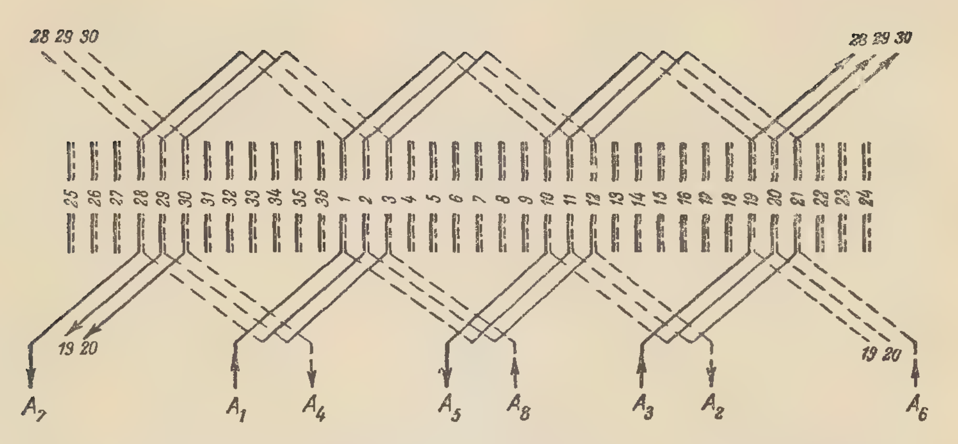


Рис. 4-16. Двухслойная волновая обмотка при $Z=36$; $2p=4$; $q=3$; $a=4$ [соединить $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8$ (начало фазы) и $A_2 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5 \rightarrow A_7$ (конец фазы)].

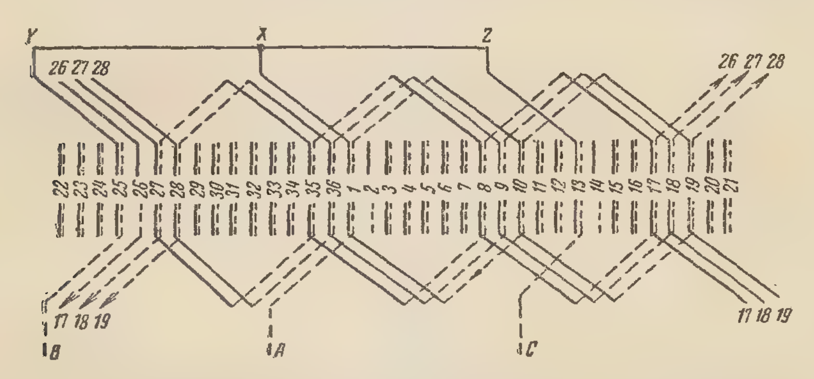


Рис. 4-17. Упрощенная схема двухслойной волновой обмотки при $Z=36$; $2p=4$; $q=3$; $a=1$.

находиться в пазу 26 $\left(\frac{2Z}{3p}-1=\frac{2\cdot 36}{3\cdot 2}-1=11;\ 36+1-11=26\right)$; для фазы B — в пазу 14$(25-11=14)$; для фазы C — в пазу 2$(13-11=2)$.

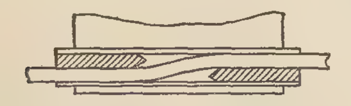


Рис. 4-18. Паз с косым стержнем, заменяющим поворотное соединение.

Обмотка не имеет параллельных ветвей ($a=1$) — все стержни каждой фазы соединены последовательно; фазы соединены в звезду. Выводы к контактным кольцам расположены с одной стороны ротора, выводы к нулевой точке — с другой стороны, что также упрощает изготовление обмотки.

Число стержней фазы на единицу меньше, чем при обычной схеме (см. рис. 4-13). Получающееся здесь небольшое искажение поля, как показали опыты, практически оказывается допустимым при работе двигателя. Так как двигатель пускается в ход при наличии пускового реостата в цепи ротора, то действие гармоник поля при пуске сильно ослабляется. Также мало сказывается на характеристиках машины некоторое повышение дифференциального рассеяния такой обмотки.

г) **Волновые обмотки при q, равном дробному числу.** Рассмотрим прежде всего двухслойные волновые обмотки при q=целое число $+1/2$. Такие обмотки приходится иногда применять для фазных роторов при серийном и мелкосерийном произ-

водстве асинхронных машин. Допустим, например, что нужно сохранить один и тот же штамп для фазных роторов 4-полюсной и 8-полюсной машин; тогда для второй машины q будет в 2 раза меньше, чем

$y_2 = 3\cdot 2\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 7$ и в конце обхода $y_2 - 1 = 6$; началами и концами фаз являются верхние стержни; поворотные соединения сделаны между нижними стержнями.

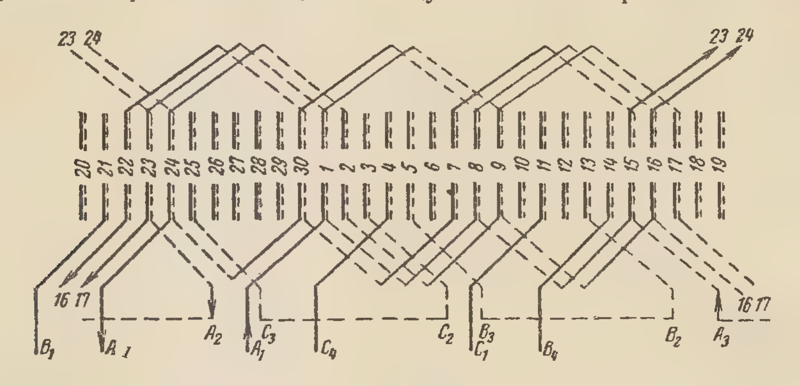


Рис. 4-19. Двухслойная волновая обмотка при $Z=30$; $2p=4$; $q=2\frac{1}{2}$.

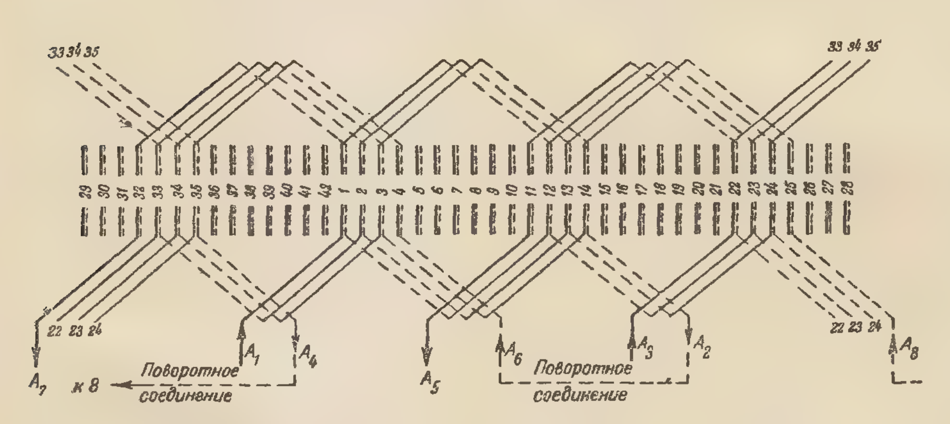


Рис. 4-20. Двухслойная волновая обмотка при $Z=42$; $2p=4$; $a=2$; $q=$ целое число $+\frac{1}{2}=3\frac{1}{2}$ [соединить $A_1 \to A_8$ (начало фазы) и $A_5 \to A_7$ (конец фазы)].

для первой; если первая машина имеет $q=5$ или 7, то вторая машина будет иметь $q=2^1/_2$ или $3^1/_2$.

Схема обмотки при $q=2\frac{1}{2}$ показана на рис. 4-19. Для рассматриваемой обмотки задний шаг должен быть равен $y_1 = 3q \pm {}^1/_2$, а передний шаг $-y_2 = 3q \mp {}^1/_2$ или $y_2 = y_1 \mp 1$. В конце обходов по окружности ротора в обоих направлениях обычно выбирается укороченный шаг, равный $y_2 - 1$. Для обмотки, схема которой представлена на рис. 4-19, взяты шаги: $y_1 = 3\cdot 2\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 8$;

Можно было бы шаги в конце обходов по окружности в одном направлении взять удлиненные ($y_2 + 1$), а в другом направлении укороченные ($y_2 - 1$); тогда мы получили бы схему, аналогичную схеме на рис. 4-14, без пересечений концов фаз и поворотных соединений.

На рис. 4-19 мы видим, что при $q=$целое число $+\frac{1}{2}$ приходится делать $\left(q - \frac{1}{2}\right)$ обходов по окружности в одном направлении и $\left(q + \frac{1}{2}\right)$ обходов по окружности в другом

направлении; поэтому здесь обе части обмотки получаются неодинаковыми и их нельзя соединять параллельно.

В случае необходимости иметь параллельные ветви в обмотке при $q=$целое число $+\frac{1}{2}$ приходится выполнять особую схему, как показано на рис. 4-20.

Составление схемы двухслойной *волновой обмотки при* q, *равном* дробному числу, когда знаменатель дроби отличается от 2, может быть выполнено на основе звезды пазовых э. д. с. Такая обмотка получается симметричной при тех же условиях, что и петлевая обмотка, имеющая q, равное дробному числу, т. е. при $2p/d$, равном целому числу, и $d/3$, равном дробному числу. Здесь также наибольшее число параллельных ветвей равно $2p/d$. Если необходимо иметь a параллельных ветвей, то $2p/da$ должно быть равно целому числу. Схема обмотки должна составляться таким образом, чтобы соединения (перемычки) между частями фаз для выбранного a можно было удобно расположить и чтобы их длины были возможно более короткими [Л. 45—47].

В последние годы в связи с применением для статорных обмоток крупных гидрогенераторов водяного охлаждения эти обмотки выполняются как однослойные волновые, что позволяет увеличить расстояния между головками секций и уменьшить количество шлангов для подвода и отвода воды. Схемы таких обмоток могут быть составлены на основе схемы двухслойной волновой обмотки, имеющей $q_д$, равное половине $q_о$ проектируемой однослойной обмотки $\left(q_д=\frac{1}{2}q_о\right)$; при этом $q_д$ для данных $2p$ и a должно удовлетворять указанным ранее условиям симметрии. При переходе от двухслойной волновой обмотки к однослойной надо принять, что между пазами двухслойной обмотки помещены добавочные пазы, в которые вынесены нижние стержни (аналогично тому как получается однослойная цепная обмотка из двухслойной петлевой).

После составления схемы обмотки с q, равным дробному числу, следует проверить симметрию фаз, э. д. с. параллельных ветвей при помощи векторной диаграммы э. д. с. обмотки (звезды пазовых э. д. с.).

4-4. КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ РОТОРНЫЕ ОБМОТКИ

Для роторов короткозамкнутых асинхронных двигателей при их нормальном исполнении применяются обмотки в виде беличьей клетки. Выполнение таких обмоток рассматривается в § 4-5.

4-5. О ВЫПОЛНЕНИИ ОБМОТОК

Для статоров асинхронных и синхронных машин применяются полузакрытые, полуоткрытые и открытые пазы.

Полузакрытые пазы обычно выбираются для статоров машин мощностью до 100 *квт* (при 1 500 *об/мин*) при напряжении до 690 *в*. Они применяются как для однослойной, так и для двухслойной обмотки. Употребительные формы таких пазов приведены на рис. 4-21.

Формулы для определения площади пазов при указанных на рисунке размерах имеют следующий вид:

$$\text{а) } S_п=\frac{\pi}{2}(r^2+r'^2)+\frac{h}{2}(b+b');$$

$$\text{б) } S_п=\frac{\pi}{2}(r^2+r'^2)+\frac{h}{2}(b+b')+b''r';$$

$$\text{в) } S_п=\frac{\pi}{2}r^2+\frac{h}{2}(b+b');$$

$$\text{г) } S_п=\frac{h}{2}(b+b')+\frac{h_з}{2}(b+b_ш);$$

$$\text{д) } S_п=\frac{\pi}{2}r'^2+\frac{h}{2}(b+b')+\frac{h_з}{2}(b+b_ш).$$

При полузакрытых пазах обычно применяется всыпная обмотка, состоящая из мягких секций. Мягкие секции выполняются из проводников круглого сечения в виде катушек

различной формы. Некоторые из них показаны на рис. 4-22. Проводники таких секций по одному закладываются в пазы через их щели (открытия, шлицы). Ширина щели $b_ш$ (рис. 4-21) выбирается в зависимости от диаметра изолированного проводника, из которого сделана секция. Этот диаметр обычно не превышает 2,0 *мм*. Если по расчету он получился бо́льшим, то эффективный проводник составляется из двух, трех или четырех (иногда до восьми) элементарных проводников, спаянных обычно в начале и конце катушечной группы и образующих, следовательно, две, три или четыре параллельные ветви (параллельные «нити»).

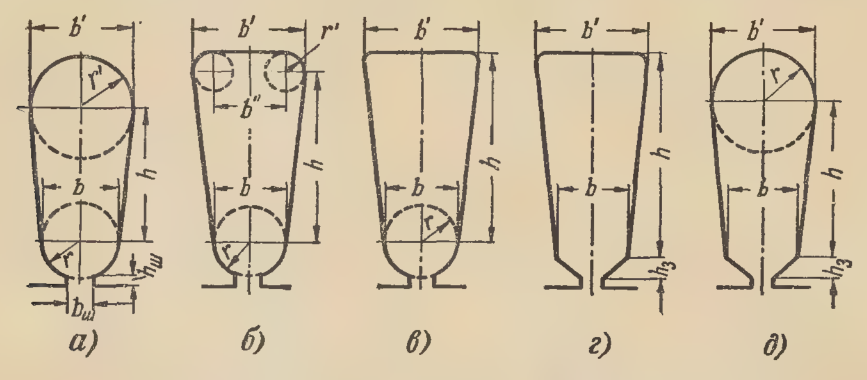
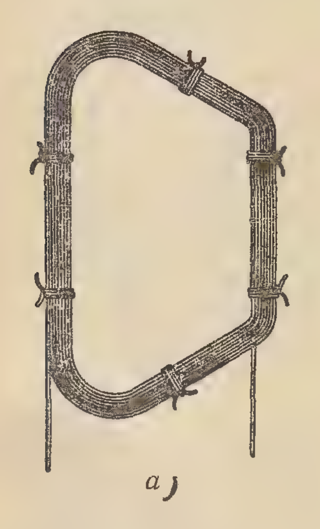


Рис. 4-21. Трапецеидальные полузакрытые пазы.



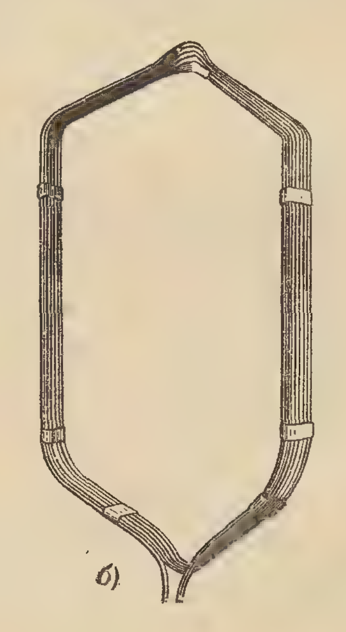


Рис. 4-22. Мягкие секции для однослойных и двухслойных обмоток.

Ширина $b_ш$ берется больше диаметра изолированного проводника, закладываемого в паз, на 1,4—1,6 *мм*. Увеличение $b_ш$ по сравнению с диаметром проводника зависит от толщины пазовой изоляции и берется тем бо́льшим, чем относительно длиннее машина.

Показанный на рис. 4-21 размер $h_ш$ (толщина «усика» зубца) берется от 0,4 до 0,8 *мм*, тем бо́льшим, чем больше мощность машины.

Для современных машин, как правило, при всыпных обмотках выбираются трапецеидальные пазы, так как в этом случае активная зона машины оказывается наилучшим образом использованной. Размеры пазов выбираются так, чтобы зубцы

имели параллельные (или приблизительно параллельные) стенки.

Трапецеидальные пазы имеют обычно небольшие размеры, и пазовая изоляция в таких пазах занимает относительно много места. Поэтому стремятся сделать ее возможно более тонкой. Ее толщина по ширине паза на одну сторону для нормальных малых машин ($<0,6$ *квт*) составляет 0,25—0,35 *мм*, для машин мощностью 0,6—100 *квт* 0,35—0,65 *мм*.

Проводники, заложенные в паз, располагаются по его сечению неравномерно, оставляя незаполненные пространства. Это обстоятельство приходится учитывать при определении размеров паза. В качестве критерия правильности выбора размеров трапецеидального паза можно использовать значение коэффициента заполнения «свободной площади паза» изолированными проводниками:

$$k_з = \frac{n_п d_{из}^2}{S_п'} \leqslant 0,75, \qquad (4\text{-}5)$$

где $n_п$ — число проводников в пазу;

$d_{из}$ — диаметр изолированного проводника;

$S_п'$ — сечение паза за вычетом площади клина, пазовой изоляции и междукатушечной прокладки.

Указанное выражение для $k_з$ дает некоторое условное для него значение. Опыт показывает, что достижение $k_з=0,75$ вызывает некоторые затруднения при выполнении обмотки. Поэтому его рекомендуется брать в пределах 0,68—0,74 (меньшие значения — для относительно длинных машин при большом числе проводников в пазу).

Полуоткрытые пазы получили широкое применение для статоров современных асинхронных машин мощностью примерно от 125 до 300—400 *квт* (при $2p=4$) для напряжений до 690 *в*. Они применяются при двухслойной обмотке и позволяют выполнять ее из жестких, заранее формованных секций. При этом секции делаются подразделенными на две части, как показано на рис. 4-23. Два их проводника, лежащие рядом по ширине паза, как правило, являются элементарными и образуют один эффективный проводник. В этом случае не требуется особой изоляционной прокладки между сторонами частей секции.

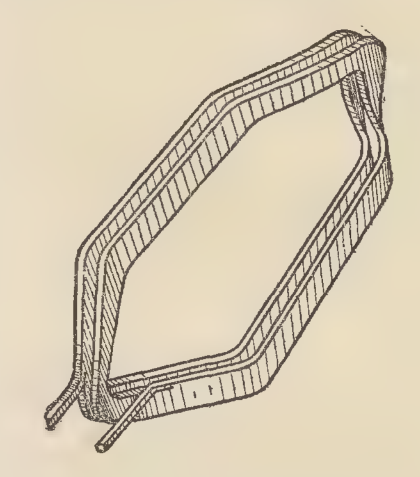


Рис. 4-23. Жесткая подразделенная секция для статора с полуоткрытыми пазами.

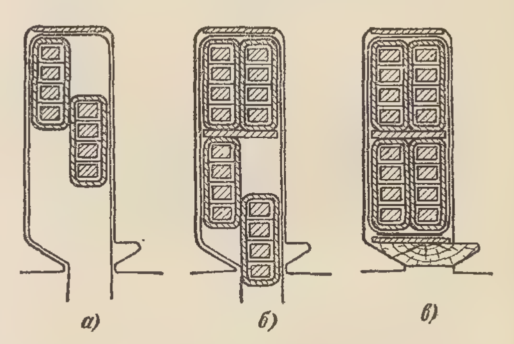


Рис. 4-24. Полуоткрытые пазы и порядок вкладывания в них сторон жестких подразделенных секций.

На рис. 4-24 показано, в каком порядке производится вкладывание подразделенных сторон секций в пазы. Представленные здесь пазы условно названы полуоткрытыми в отличие от ранее рассмотренных полузакрытых пазов. Они имеют ширину щели паза, обычно немного бо́льшую, чем половина ширины самого паза.

При выполнении обмотки рекомендуется положить в паз тонкий лощеный картон, образующий так называемую проходную коробку.

Она показана на рис. 4-24, *а* и *б* тонкими линиями, выступающими из паза. Толщина картона выбирается равной 0,2 *мм*. Проходная коробка позволяет избежать при укладке секций повреждений их изоляции о края зубцов и в то же время облегчает укладку секций.

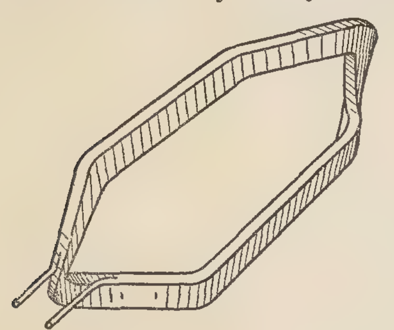


Рис. 4-25. Жесткая секция двухслойной обмотки для открытых пазов.

Ширина щели (открытие) паза должна быть больше ширины полусекции на 1,4—1,6 *мм*, причем в эту добавку входит увеличение толщины изоляции от разбухания при пропитке и толщины сторон проходной коробки.

Открытые пазы обычно делаются для машин большой мощности при напряжениях на тысячи вольт, но также и при напряжениях до 690 *в*. При таких пазах применяется двухслойная обмотка, состоящая из жестких секций, в виде показанной на рис. 4-25. Укладка жестких секций и вид их лобовых частей показаны на рис. 4-26.

На рис. 4-27 приведены наиболее употребительные формы пазов

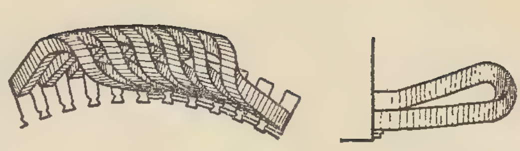


Рис. 4-26. Укладка жестких секций в открытые пазы и их лобовые части.

статора. При выборе указанных на этом рисунке размеров можно руководствоваться табл. 4-2.

Таблица 4-2

Размеры пазов статора, *мм*

$b_п$	⩽ 10	10—15	15—20	⩾20
$h_щ$	0,5	0,5	0,5	0,8
$h_к$	2,5	3,5	4,5	6,5
b_1	$b_п + 1,36$	$b_п + 2,03$	$b_п + 3,1$	$b_п + 4,83$
b_2	$b_п + 2,18$	$b_п + 3,05$	$b_п + 4,02$	$b_п + 6,66$

При определении размеров паза различают его размеры «в свету» («обмоточные») и «в штампе». Размеры «в свету» определяются размерами и количеством изолированных проводников в пазу, толщинами добавочной витковой изоляции (если она имеется), корпусной (пазовой) изоляции, междукатушечной прокладки и клина. Размеры «в штампе» должны быть взяты несколько бо̀льшими, чем размеры «в свету», так как необходимо учитывать неточность штамповки и сборки листов и получающийся вследствие этого сдвиг их друг относительно друга (образование «гребенки»). Можно при этом руководствоваться табл. 4-3.

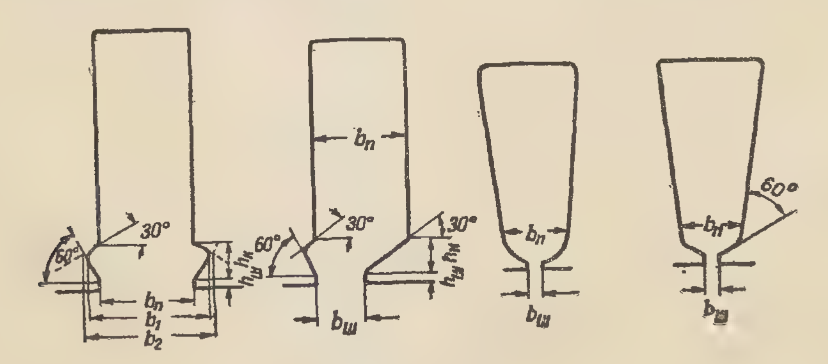


Рис. 4-27. Пазы статора.

Таблица 4-3

Припуски на штамповку, *мм*

Ширина паза	По ширине	По высоте
При $b_п \leqslant 3$	0,2	0,2
При $b_п = 3-8$	0,3—0,4	0,2
При $b_п > 8$	0,4—0,5	0,2

При выполнении статорных обмоток из проводников прямоугольного сечения следует их укладывать плашмя, т. е. широкой стороной по ширине паза и узкой стороной по высоте его, в отличие от якорных обмоток машин постоянного тока и роторных стержневых обмоток, при выполнении которых проводники располагаются обычно стоймя. Указанная укладка проводников статорных обмоток необходима для уменьшения добавочных потерь от вихревых токов в проводниках, которые возрастают пропорционально четвертой степени их высоты. Рекомендуется избегать проводников с сечением, близким к квадрату, так как такие проводники склонны закручиваться.

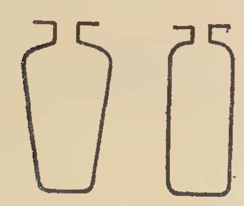


Рис. 4-28. Пазы фазного ротора небольших машин.

Для роторов асинхронных машин с контактными кольцами (фазных) применяются полузакрытые и открытые пазы — трапецеидальные и с параллельными стенками. Трапецеидальные и овальные пазы применяются только для небольших машин (рис. 4-28). В этом случае ротор иногда выполняют с однослойной катушечной обмоткой при двухъярусном расположении лобовых частей (рис. 4-29). В настоящее время при таких пазах для ротора обычно выбирается всыпная однослойная или двухслойная обмотка, как для статора.

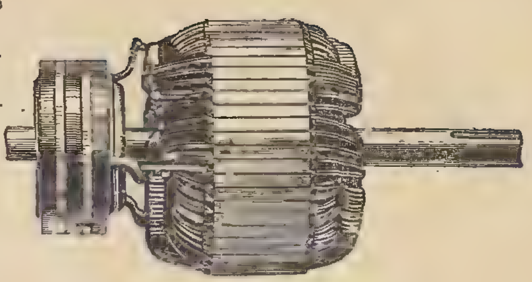


Рис. 4-29. Ротор с катушечной обмоткой.

Открытые пазы шириной не больше 5—6 *мм* в последние годы применяются для машин мощностью до 100 *квт* при двухслойной петлевой обмотке, выполняемой из проводников прямоугольного сечения и состоящей из жестких секций.

Полузакрытые пазы с параллельными стенками находят преимущественное применение для фазных роторов асинхронных машин мощностью свыше 100 *квт* (при $2p=4$).

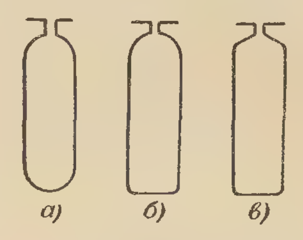


Рис. 4-30. Пазы фазного ротора при стержневой обмотке.

Формы таких пазов показаны на рис. 4-30. Из них более часто применяются формы *б* и *в*. Ширину щели паза берут от 1,5 до 2,5 *мм*, высоту усика 0,5—1,5 *мм*. При рассматриваемых пазах применяется



Рис. 4-31. Полусекция волновой роторной обмотки.

двухслойная волновая обмотка, называемая также волновой роторной. Она изготовляется из полусекций, имеющих сформованную лобовую часть только с одной стороны (рис. 4-31). Каждая полусекция состоит

из проводника прямоугольного или (редко) специального профильного сечения, изолированного по всей длине, кроме концов. Полусекции вдвигаются в пазы с торца, после чего их лобовым частям на противоположной стороне придается надлежащая форма, как показано на рис. 4-31 пунктиром. Концы полусекции на лобовых частях соединяются при помощи хомутиков, причем между стержнями помещается медный клин, после чего все соединения пропаиваются обычно оловянным припоем (рис. 4-32). На рис. 4-33 показаны лобовые части волновой роторной обмотки со стороны контактных колец. Для получения более интенсивной вентиляции в хомутики (через 3—5), соединяющие верхний и нижний стержни секции, вставляются пластинки из жести. Они служат в качестве вентиляторных крыльев.

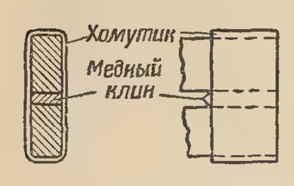


Рис. 4-32. Соединение концов полусекций хомутиком с клином.

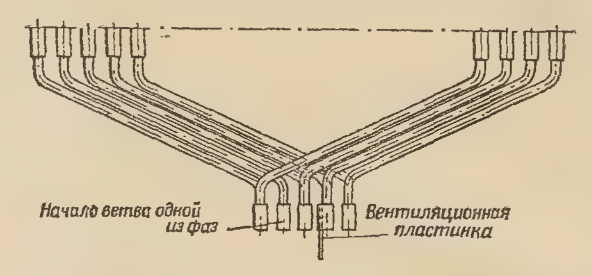


Рис. 4-33. Лобовые части волновой роторной обмотки.

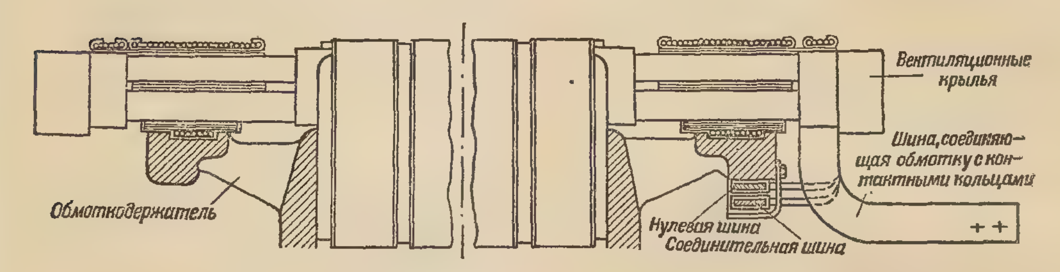


Рис. 4-34. Продольный разрез ротора с волновой двухслойной обмоткой.

На рис. 4-34 представлен продольный разрез ротора с обмоткой. Здесь показано расположение шины, соединяющей концы фаз в нулевую точку, шины, соединяющей правый и левый обходы каждой фазы, и шины, соединяющей обмотку с контактным кольцом. Для облегчения сборки и разборки машины лобовые части обмотки ротора отгибаются к центру машины примерно на 5—7 *мм,* как показано на рис. 4-35.

Согласно основному ГОСТ на электрические машины выводы об-



Рис. 4-35. Лобовые части роторной обмотки.

Таблица 4-4

Трехфазные обмотки статора (якоря)

Схема соединений обмоток	Число выводов	Названия выводов	Обозначения выводов: начало	Обозначения выводов: конец
Открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	C1 C2 C3	C4 C5 C6
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	C1 C2 C3 0	
Соединение треугольником	3	Первый зажим Второй зажим Третий зажим	C1 C2 C3	

моток должны иметь обозначения, указанные в табл. 4-4 и 4-5.

Таблица 4-5

Трехфазные обмотки фазного ротора

Число выводов на контактных кольцах	Названия выводов	Обозначения выводов
3	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	P1 P2 P3
	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	P1 P2 P3 0

Для короткозамкнутых роторов асинхронных машин применяются пазы различной формы. На рис. 4-36, *а* представлены пазы круглый,

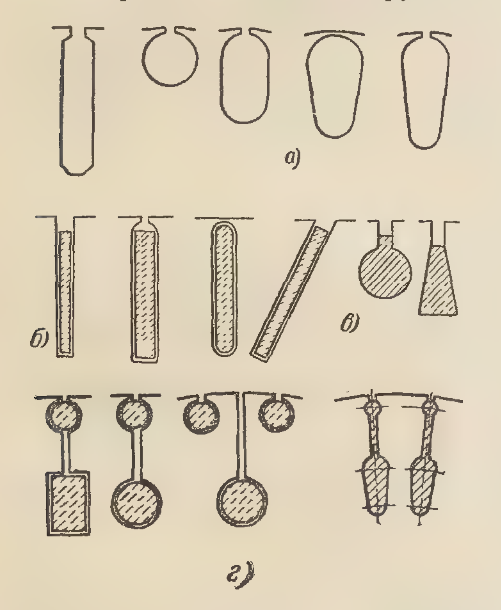


Рис. 4-36. Пазы короткозамкнутых роторов.

овальный, трапецеидальный овальный (грушевидный) и с параллельными стенками. Круглые пазы, в которых помещаются медные стержни, делаются только для малых машин и иногда для машин средней мощности при $2p=2$. В этом случае они выполняются полузакрытыми с шириной щели 1—2 *мм*. Для малых машин они выполняются также и закрытыми с толщиной перекрытия над серединой паза 0,2—0,4 *мм*. При таких пазах, так же как и при других пазах, показанных на рис. 4-36, *а*, обычно применяется «литая» обмотка из алюминия, т. е. обмотка, полученная путем заливки в пазы расплавленного алюминия. Одновременно с заливкой алюминия в пазы отливаются короткозамыкающие кольца на торцах, а при этом, и вентиляторные лопатки, составляющие одно целое с кольцами.

Простота и дешевизна изготовления литой обмотки и уменьшение веса ротора дают большую экономию при массовом изготовлении короткозамкнутых двигателей. Поэтому такие обмотки получили в настоящее время самое широкое распространение.

На рис. 4-36, *б* показаны глубокие пазы, в которые закладываются узкие медные стержни. Ширину глубокого паза обычно берут 3—5 *мм*, глубина же его доходит до 40—60 *мм*. Иногда с целью увеличения высоты ярма ротора выбирается наклонный паз, показанный на рис. 4-36, *б* справа.

Овальные, грушевидные пазы и пазы с параллельными стенками, показанные на рис. 4-36, *а*, делаются несколько углубленными, поэтому они занимают некоторое промежуточное положение между круглыми и глубокими пазами.

На рис. 4-36, *в* показаны пазы с утолщенной нижней частью, имеющие стержни соответствующего сечения. Такие пазы в последние годы находят применение для короткозамкнутых роторов средних и больших асинхронных машин.

На рис. 4-36, *г* показаны пазы, при которых по предложению Доливо-Добровольского применяется обмотка в виде двойной клетки. Здесь справа приведены пазы, применяемые при двойной клетке, получаемой путем заливки пазов алюминием.

В верхнюю часть паза (обычно круглую) закладывается стержень из латуни, бронзы или какого-либо другого материала с большим удельным сопротивлением, чтобы повысить теплоемкость верхней клетки и тем самым уменьшить ее нагревание за время пуска. В нижнюю часть паза (круглую или прямо-

угольную) закладывается всегда медный стержень. Верхние и нижние стержни двойной клетки на торцах замыкаются обычно отдельными кольцами (рис. 4-37), так как при этом получается более надежная конструкция. При заливке пазов алюминием на торцах делаются общие короткозамыкающие кольца.

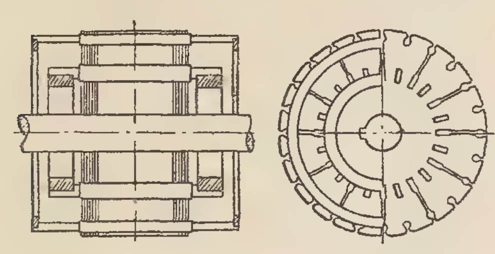


Рис. 4-37. Ротор с двойной клеткой.

4-6. ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК

а) **Общие замечания.** Как отмечалось, для обмоток статора небольших машин на напряжение до 690 *в* в качестве витковой изоляции обычно служит изоляционное покрытие проводов, а для напряжений от 3 000 *в* и выше требуется усиленная витковая изоляция.

Пазовая изоляция, как правило, выполняется из нескольких слоев изоляционных материалов, что позволяет получить более плотное прилегание ее к стенкам паза и проводникам. Ее конструкция должна не только обеспечить высокую электрическую прочность и надлежащие нагревостойкость и влагостойкость изоляции, но и быть достаточно прочной механически.

Для обмоток на напряжение до 690 *в* толщина пазовой изоляции определяется в основном необходимостью иметь изоляцию, способную выдерживать механические воздействия, возникающие при изготовлении обмоток и эксплуатации машин. В машинах небольшой мощности, где эти воздействия невелики. толщина пазовой изоляции меньше, чем в машинах средней и большой мощности.

Очевидно, что использование площади паза будет тем бо̀льшим, чем меньше толщины витковой и пазовой изоляции. Однако практикой установлены толщины изоляции, меньше которых при современном состоянии изоляционной техники их брать не следует, чтобы не снизилась надежность изоляции.

При выборе витковой и пазовой изоляции рекомендуется руководствоваться приведенными в дальнейшем указаниями, а также таблицами в приложении VII.

Ранее рассматривался коэффициент заполнения изолированными проводниками свободной площади паза $k_з$ [см. (4-5)], который позволяет определить при выбранной толщине пазовой изоляции размеры полузакрытого паза для всыпной обмотки из мягких секций. Но он не определяет использования всей площади паза.

В качестве критерия использования всей площади паза может служить *коэффициент заполнения паза медью* $k_{з.м}$, под которым понимается отношение сечения всех проводников (голых) в пазу к площади его сечения «в свету». Повышение значения $k_{з.м}$ представляет важную задачу в электромашиностроении. Для машин при применении круглых проводов марки ПЭЛБО и прямоугольных проводов марки ПБД $k_{з.м}$ имеет в среднем значения, указанные в табл. 4-5а. Из таблицы видно, насколько плохо при таких проводах используются пазы для укладки в них меди.

Таблица 4-5а

Для обмоток на напряжения, *в*	$k_{з.м}$
До 550 (круглый провод)	0,30
3150 (прямоугольный провод)	0,22—0,37
6300 (прямоугольный провод)	0,14—0,25

При этом для обмоток из круглого провода на напряжения до 550 *в* плохое использование паза обусловлено главным образом изоляцией самого провода, а на напряжения 3 150 и 6 300 *в* — витковой и особенно корпусной (пазовой) изоляцией.

Исследования [Л. 49] показывают, что повышение $k_{з.м}$ на $\alpha\%$ (в пределах 0—30%) позволяет повысить мощность машины примерно на $0{,}75\alpha\%$. Поэтому уменьшение толщины изоляции проводов, витковой и корпусной изоляции с экономической стороны имеет большое значение.

В настоящее время для малых и средних машин нормального исполнения при круглых проводах вместо провода марки ПЭЛБО применяется эмалированный провод марки ПЭВ-2 или ПЭТВ, при котором в ряде случаев удается получить повышение $k_{з.м}$ на 15—20%.

В машинах мощностью 100—1 000 *квт* на напряжения 3 150 и 6 300 *в* для обмотки статора применялся провод марки ПБД с хлопчатобумажной изоляцией. Двусторонняя толщина изоляции провода составляет 0,27—0,33 *мм* в зависимости от размеров провода. Однако хлопчатобумажной изоляции провода недостаточно для обеспечения надежной изоляции между витками катушек статора, что заставляло применять либо прокладки между витками из электрокартона или гибкого миканита (двигатели меньших мощностей), либо накладывать на провод непрерывную изоляцию из синтоленты или микаленты в 1/3 или 1/2 нахлеста (двигатели бо́льших мощностей).

Корпусная изоляция катушек состоит из нескольких слоев микаленты, защищенных снаружи слоем хлопчатобумажной ленты. Катушки подвергаются пропитке компаундной массой, которая заполняет все пустоты между проводниками и слоями изоляции. Суммарная односторонняя толщина корпусной изоляции составляет для машин на 3 150 *в* около 2 *мм*, на 6 300 *в* — около 3 *мм*.

Междувитковая изоляция из микаленты, наложенная на проводники катушки, в сочетании с хлопчатобумажной обмоткой создает между витками изоляционный слой толщиной 0,90—0,95 *мм*. При этих условиях $k_{з.м}$ составлял для двигателей мощностью 400—1 000 *квт* на 3 000 *в* около 35%, на 6 000 *в* — около 25%. Такие низкие значения $k_{з.м}$ не могли быть повышены за счет уменьшения корпусной изоляции, так как это могло бы привести к понижению надежности машин в эксплуатации.

Повышение $k_{з.м}$ достигается за счет применения прямоугольного провода марки ППТБО или ППЛБО. Толщина изоляционного слоя между соседними витками при таком проводе составляет около 0,45—0,50 *мм*. Его электрическая прочность, как показали опыты, вполне достаточна для машин на 3 150 и 6 300 *в*. При этом проводе можно обойтись без дополнительной междувитковой изоляции, что существенно повышает значение $k_{з.м}$ при малом числе элементарных проводников в одном эффективном.

Провода марок ППТБО и ППЛБО имеют изоляцию класса А.

В последнее время разработаны аналогичные обмоточные провода с изоляцией класса В при двусторонней толщине ее около 0,50 *мм*, имеющие изоляционное покрытие из нагревостойкого эмалевого лака и стеклослюдинита.

Конструкция пазовой изоляции и изоляции лобовых частей обмоток, примеры выполнения которой приводятся в приложении VII, зависит от напряжения и мощности машины, а также от условий ее эксплуатации. Она разрабатывается на основе имеющихся изоляционных материалов путем всесторонних исследований на макетах и опытных образцах машин.

Данные по выполнению изоляции обмоток статора машин общепромышленного применения, приведенные в последующем изложении и в табл. VII-1—VII-11, в основном заимствованы из [Л. 27], где даются также более подробные сведения о изоляции рассматриваемых обмоток с указанием марок изоляционных материалов и проводов для внутримашинных соединений, пропиточных и покровных лаков, компаундов. Эти данные соответствуют выполнению изоляции обмоток современных машин, выпускаемых заводами Советского Союза.

б) **Изоляция статорных обмоток на напряжение до 690 *в* при полу-**

Таблица 4-6

Провода для всыпных статорных обмоток асинхронных и синхронных машин мощностью 0,6—100 *квт* (2*р*=4)

Исполнение	Марка провода для класса изоляции				
	A	E	B	F	H
Нормальное	ПЭВ-2	ПЭТВ ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСДК ПСДКТ
Усиленно влагостойкое и тропическое	ПЭВ-2	ПЭТВ	ПЭТВ (ПСДТ)	ПСД ПСДТ	ПСДК ПСДКТ
Химически стойкое	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСД ПСДТ	ПСДК ПСДКТ

закрытых пазах. Обратимся к обмоткам статора небольших асинхронных и синхронных машин мощностью 0,6—7 *квт* (2*р*=4). Применяемые для них провода при различных исполнениях машин указаны в табл. 4-6*.

Для машин мощностью 0,6—7 *квт* при 2*р*⩾4 в большинстве случаев выбирается однослойная обмотка, выполняемая обычно как простая шаблонная, но с неодинаковыми по ширине катушками при их концентрическом расположении. Только при 2*р*=2 предпочитают брать двухслойную обмотку с большим укорочением шага, так как в изготовлении она оказывается более удобной.

Пример выполнения пазовой изоляции обмоток указанных машин приведен на рис. VII-1 и в табл. VII-1. Провода в лобовых частях обычно оставляют без дополнительной изоляции, ставят только прокладки между катушками из материала ссответствующей нагревостойкости и обертывают катушечные группы в их крайних частях тафтяной лентой (класс А) или стеклолентой (классы Е—Н). С торцов пакета статора пазовая изоляция должна выступать примерно на 8 *мм*. Для машин мощностью 0,4 *квт* и меньше толщина пазовой изоляции может быть уменьшена до 0,25—0,15 *мм*.

Для двухслойных обмоток статора машин мощностью 10—100 *квт* (2*р*=4) применяются провода, указанные в табл. 4-6. Пример выполнения изоляции этих обмоток приведен на рис. VII-2 и в табл. VII-2.

Для упрочнения корпусной изоляции на выходе из паза применяются концевые шайбы (из электронита толщиной 3—4 *мм*); пазовая изоляция должна выступать за пределы пакета примерно на 15 *мм*.

В табл. VII-2 указаны материалы для всех классов изоляции машин нормального исполнения. Для машин тропического и химически стойкого исполнений, если температура нагрева их изоляции допускает применение материалов классов А, Е и В, во всех случаях следует применять материалы, рекомендованные для изоляции класса В, но заменить электрокартон электронитом.

Для обмоток класса В всех исполнений (кроме химически стойкого) целесообразно заменить стеклолакоткань, примененную в качестве вспомогательной изоляции, полиэтилентерефталатной пленкой толщиной 0,05 *мм*, значительно облегчающей укладку.

Материалы для изоляции классов F и H пригодны для машин всех исполнений.

в) **Изоляция статорных обмоток на напряжение до 690 *в* при полуоткрытых пазах.** Полуоткрытые пазы применяются для статоров асинхронных машин мощностью примерно от 125 до 400 *квт* (при 2*р*=4). При этом, как отмечалось, обмотка

* Те же провода применяются и для машин мощностью 10—100 *квт* (2*р*=4).

выполняется из секций, подразделенных на две части. Будем эти части называть полукатушками. Полукатушки попарно наматываются из прямоугольных проводов при классе изоляции А марки ПБД, ПЭВППИ или ПЭВП, а при классе изоляции В марки ПЭТВП или ПСД. Лодочки из проводов марки ПБД до опрессовывания и растяжки пропитываются лаком. Вследствие разбухания от пропитки толщина витковой изоляции одного витка увеличивается на 0,05 *мм* в пазовой части и на 0,1 *мм* в лобовой части, что следует учитывать при определении размеров проводников в пазу и лобовой части.

При применении проводов марок ПЭВППИ, ПЭВП и ПЭТВП увеличения толщины витковой изоляции можно не учитывать, так как катушки не пропитываются, а промазываются цементирующим лаком.

Обычно при полуоткрытых пазах обмотки выполняются с изоляцией класса А из проводов марки ПЭВППИ или ПБД. Пример выполнения изоляции таких обмоток приведен на рис. VII-3 и в табл. VII-3.

Для обмоток с изоляцией класса В рекомендуется применение лакослюдопласта в виде одной пазовой коробочки при проводах марки ПЭТВП. Такая конструкция изоляции представлена на рис. VII-4 и в табл. VII-4.

Применение для обмоток с изоляцией класса В при полуоткрытых пазах проводов марки ПСД приводит к большим затруднениям, так как изоляционное покрытие этих проводов имеет недостаточную механическую прочность, что требует усиления их изоляции, а дополнительная изоляция между витками полукатушек в виде прокладок может смещаться. Поэтому обмотки из проводов марок ПСД и ПСДК, а также обмотки тропического и химически стойкого исполнений, к изоляции которых предъявляются более жесткие требования, выполняются катушечными при открытых пазах с полностью нанесенной на катушки корпусной изоляцией. Последняя получается более надежной,

Таблица 4-7

Витковая изоляция статорных обмоток при открытых пазах на напряжение до 690 *в*

Исполнение	Класс А		Классы Е, В		Класс F		Класс Н		Толщина дополнительной изоляции, *мм*
	Марка провода	Дополнительная изоляция	Марка провода	Дополнительная изоляция	Марка провода	Дополнительная изоляция	Марка провода	Дополнительная изоляция	
Нормальное	ПБД	—	ПСД, ПСДТ	Гибкий слюдинит или гибкий стеклослюдинит	ПСД, ПСДТ	Гибкий стекломиканит	ПСДК	Гибкий стекломиканит	0,2—0,25
Усиленно влагостойкое	ПСД	Гибкий миканит						То же	0,2—0,25
Тропическое	—	—	ПСД, ПСДТ	Гибкий миканит	ПСД, ПСДТ	То же	ПСДК	То же	0,2—0,25
Химически стойкое	ПСД, ПСДТ	Гибкий стекломиканит		Гибкий стекломиканит				—	0,2—0,25

Примечание. Для прокладок берутся материалы со связующими, соответствующими указанным классам нагревостойкости.

чем рассмотренная ранее изоляция паза.

Обмотки при полуоткрытых пазах, как правило, не выполняются на высокое напряжение (3 000 *в* и выше).

г) **Изоляция статорных обмоток на напряжение до 690 *в* при открытых пазах.** Витковая изоляция обмоток с нагревостойкостью классов В, F и Н, выполненных из проводов марки ПСД или ПСДК, должна быть усилена прокладками из материалов соответствующих классов нагревостойкости. Эти материалы, толщины прокладок, а также марки проводов для машин различных исполнений указываются в табл. 4-7.

При определении размеров паза необходимо вначале рассчитать размеры катушечных сторон без корпусной изоляции. Лодочки, из которых после опрессовывания и растяжки получаются катушки обмотки, до нанесения на них корпусной изоляции пропитываются. Размеры лодочек с учетом разбухания от пропитки или компаундирования рассчитываются по приведенным ниже формулам.

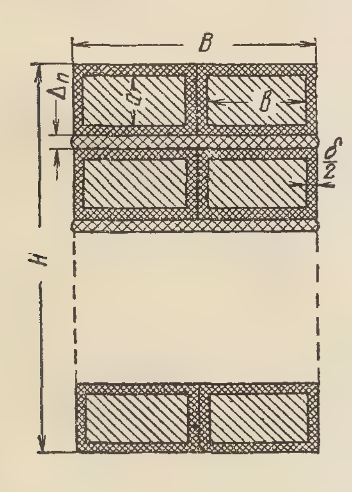


Рис. 4-38.

1. *Лодочка имеет дополнительную междувитковую изоляцию в виде прокладок (рис. 4-38), пропитана и опрессована после пропитки.*

Расчетные формулы (все размеры в миллиметрах):

$$\left.\begin{aligned} B&=(b+\delta)\,p_ш+0{,}05\,p_ш+0{,}1\ \text{мм};\\ H&=(a+\delta+r)\,p_в+0{,}05\,p_в+\\ &\quad+\Delta_п\,(p_в-1)+0{,}1\ \text{мм}, \end{aligned}\right\}\quad(4\text{-}6)$$

где B — размер лодочки по ширине;

H — размер лодочки по высоте;

a и b — размеры голой меди;

δ — двусторонняя толщина изоляции провода;

$\Delta_п$ — толщина прокладки;

$p_ш$ — число витков лодочки по ширине;

$p_в$ — число витков лодочки по высоте;

0,05 — величина разбухания изоляции от пропитки на 1 виток;

0,1 — величина разбухания изоляции от пропитки на поверхности катушечной стороны (наплывы лака);

r — увеличение толщины изоляции провода по высоте («бочка»); для проводов марки ПБД $r=0$; для проводов марки ПСД $r=0{,}05$ при отношении большей стороны к меньшей до 2,0; $r=0{,}15$ при отношении сторон от 2,1 до 4,0; $r=0{,}25$ при отношении сторон свыше 4,1.

2. *Лодочка выполнена с дополнительной междувитковой изоляцией в виде прокладок (рис. 4-38), прокомпаундирована и опрессована после компаундирования.*

Расчетные формулы (все размеры в миллиметрах):

$$\left.\begin{aligned} B&=(b+\delta)\,p_ш+0{,}05\,p_ш+0{,}2\ \text{мм};\\ H&=(a+\delta+r)\,p_в+\Delta_п\,(p_в-1)+\\ &\quad+0{,}12\,p_в+0{,}2\ \text{мм}, \end{aligned}\right\}\quad(4\text{-}7)$$

где 0,05 — величина разбухания от компаундирования изоляции на 1 виток по ширине лодочки;

0,12 — величина разбухания от компаундирования изоляции на 1 виток по высоте лодочки;

0,2 — величина разбухания от компаундирования изоляции на поверхности лодочки (налипы компаунда).

Обмотки при открытых пазах обычно имеют два различных типа корпусной изоляции:

а) гильзовую, при которой пазовая часть изолируется простынкой из листового электроизоляционного материала («твердая» или «мягкая» гильза), а лобовая часть — лентой;

б) непрерывную, при которой каждая катушка обмотки по всей ее длине изолируется лентой.

Гильзовая изоляция может быть твердой и мягкой в зависимости от свойств применяемых материалов.

Для твердой изоляции в настоящее время применяются микафолий или стекломикафолий — материалы на термореактивных связующих. Они, по-видимому, будут заменяться более дешевыми материалами — слюдинитофолием, слюдопластофолием или стеклослюдинитофилием. Материалы наносятся на пазовую часть путем обкатки в горячем утюге и затем опрессовываются. В результате получается твердая гильза, охватывающая проводники катушечной стороны обмотки. До изолирования пазовых частей на лобовые части обычно наносятся два слоя микаленты или стекломикаленты с последующей пропиткой.

Пример выполнения твердой гильзовой изоляции приведен на рис. VII-5 и в табл. VII-5.

К недостаткам указанной изоляции надо отнести хрупкость твердой гильзы, что в ряде случаев приводит к ее повреждениям при укладке катушек в пазы. Изоляция в виде мягкой гильзы осуществляется обертыванием пазовой части катушечной стороны гибким оклеечным миканитом с последующим закреплением лентой (табл. 4-8). Выкладка паза, прокладки, клин и изоляция лобовых частей остаются теми же, что и при изоляции в виде твердой гильзы (см. рис. VII-5 и табл. VII-5).

Таблица 4-8

Изоляция пазовой части катушечной стороны «мягкой гильзой»

Часть обмотки	Позиция на рис. VII-5	Класс В, нормальное и усиленно влагостойкое исполнения					
		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
		наименование	толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая на катушечную сторону	*1*	Гибкий миканит	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
	2	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык		0,2	0,2
		Разбухание от пропитки	—	—	—	0,2	0,2
		Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	1,8	1,8

В машинах с изоляцией классов А и Е вместо гибкого миканита можно применять полиэтилентерефталатную пленку. Мягкая гильза хорошего качества получается при длине прямой части катушечной стороны, не превышающей 450 *мм*.

Гильзовая изоляция в виде мягкой гильзы применяется для обмоток на напряжение до 690 *в*, а при напряжениях 3 150 и 6 300 *в* она, как правило, выполняется в виде твердой гильзы.

По влагостойкости пазовых частей изоляцию из твердой и мягкой гильзы можно считать равноценной непрерывной компаундированной изоляции; влагостойкость лобовых частей обмоток с гильзовой изоляцией значительно ниже, чем непрерывной.

Преимуществом гильзовой изоляции перед непрерывной является ее меньшая толщина и меньшая трудоемкость при выполнении (особенно мягкой гильзы); однако в случае требований высокой влагостойкости и механической прочности следует применять непрерывную компаундированную изоляцию. Пример выполнения такой изоляции пред-

ставлен на рис. VII-5 и в табл. VII-6.

Компаундированная непрерывная изоляция имеет бо̀льшую толщину, чем гильзовая (ср. данные табл. VII-6 и VII-5). Максимальная температура, при которой может быть использована обмотка низкого напряжения (до 690 *в*) с компаундированной изоляцией, не должна превышать 125° С (130° С), причем для обмоток при температуре свыше 105° С необходимо взять для компаундирования битум с температурой размягчения до значений, указанных в табл. 4-9.

Таблица 4-9

Зависимость максимально допустимой температуры обмотки от температуры размягчения компаунда

Температура размягчения компаунда по «кольцу и шару», °С	Максимально допустимая температура обмотки, °С		
	для нормальных условий		для тропических условий при напряжении 690, 3 150 и 6 300 *в*
	при напряжении 3 150 и 6 300 *в*	при напряжении до 690 *в* (включительно)	
114—119	105	110	100
Не менее 120	115	120	105
Не менее 125	120	125	115

Данными табл. 4-9 следует также руководствоваться при выборе компаунда для обмоток на напряжении от 3 000 *в* и выше.

Машины переменного тока общего применения при напряжении до 690 *в* выпускаются заводами обычно на мощности до 400 *квт* (при $2p=4$), но по специальным заказам они могут выполняться и на бо̀льшие мощности (примерно до 1 000 *квт*). Двигатели и генераторы на мощности свыше 400 *квт* в большинстве случаев выполняются соответственно на напряжения 3 000—3 150 и 6 000—6 300 *в*, а при мощности от 1 250 *квт* и выше — также на напряжения 10 000—10 500 *в*.

д) **Изоляция статорных обмоток на напряжения 3 150—10 500 *в*.** Современные машины общего применения на напряжение от 3 000 *в* и выше всегда имеют статоры с открытыми пазами, позволяющими получить более надежную изоляцию обмотки, причем обычно при напряжении 3 000—3 150 *в* для их обмоток наряду с непрерывной компаундированной применяется и гильзовая изоляция; для машин на напряжение 6 000 *в* и выше наиболее часто применяется непрерывная компаундированная изоляция. Обмотки на указанные напряжения должны иметь высокую электрическую прочность, так как при эксплуатации машин коммутационные и атмосферные перенапряжения могут достичь трех-четырехкратных значений рабочего напряжения [Л. 28а].

При применении проводов ПБД и ПСД требуется усиление витковой изоляции. Ранее для этого широко применялись прокладки между витками из электрокартона, гибкого слюдинита, гибкого миканита и др. (как при напряжении до 690 *в*, рис. 4-38). Однако опыт показал, что дополнительная витковая изоляция в виде прокладок при напряжениях от 3 000 *в* и выше мало эффективна: почти не повышает пробивного напряжения витковой изоляции.

Более надежной является изоляция каждого витка из провода ПБД или ПСД микалентой толщиной 0,10 или 0,13 *мм* в $\frac{1}{3}$—$\frac{1}{2}$ нахлеста. Применение вместо микаленты пленкобумажной ленты нежелательно из-за относительно быстрого теплового старения пленки. Толщина витковой изоляции при применении микаленты достигает 0,85—0,90 *мм*. Для обмоток современных машин с изоляцией класса А применяются провода ППЛБО или ППТБО, не требующие дополнительной витковой изоляции (следует предпочесть провод ППЛБО как более надежный). Толщина витковой изоляции этих проводов с учетом разбухания от компаундирования лодочек — около 0,55 *мм* на обе стороны.

В табл. 4-10 приведены данные по витковой изоляции статорных обмоток с гильзовой изоляцией на напряжения 3 000—3 150 *в*, а в табл. 4-11 — те же данные статорных обмоток с непрерывной компаундированной изоляцией на напряжения 3 000—3 150 и 6 000—6 300 *в*.

Витковая изоляция статорных обмоток машин переменного

Исполнение	Класс А					Класс В	
	Марка провода	Толщина изоляции, *мм*	Дополнительная изоляция	Толщина дополнительной изоляции, *мм*	Общая толщина изоляции, *мм*	Марка провода	Толщина изоляции, *мм*
Нормальное и усиленно влагостойкое	ППЛБО (ППТБО)	0,45	—	—	0,55	ПСД	0,27—0,33
Тропическое и химически стойкое	ПСД	0,27—0,33	Эскапоновая стеклолакоткань 0,13 *мм*, 1 слой в $^1/_3$ нахлеста	0,5	0,9—1,0	ПСД	0,27—0,33
Нагревостойкий провод со стеклослюдинитовой изоляцией	0,50	—	—	—	0,50	То же	0,50

Витковая изоляция статорных обмоток машин переменного тока с

Исполнение	Класс А				
	Марка провода	Толщина изоляции, *мм*	Дополнительная изоляция	Толщина дополнительной изоляции, *мм*	Общая толщина изоляции, *мм*
Нормальное и усиленно влагостойкое	ПБД ППЛБО (ППТБО)	0,27—0,33 0,45	Микалента толщиной 0,13 *мм* в $^1/_3$ нахлеста —	0,4—0,5 —	0,85—0,95 0,55
Тропическое	—	—	—	—	—
Химически стойкое	ПСД	0,27—0,33	Микалента толщиной 0,10—0,13 *мм* в $^1/_3$ нахлеста	0,4—0,5	0,85—0,95

Приведенные данные по витковой изоляции относятся к машинам мощностью до 1 000 *квт*. Для более мощных и особо ответственных машин она иногда выполняется из двух слоев микаленты, намотанной в $^1/_3$—$^1/_2$ нахлеста. Также выполняется витковая изоляция обмоток на напряжения 10 000—10 500 *в*.

Приведем расчетные формулы, по которым при указанных типах витковой изоляции определяются размеры сечения стороны катушки, подготовленной к нанесению корпусной изоляции.

1. Лодочка намотана из проводов ПБД или ПСД с непрерывной дополнительной междувитковой изо-

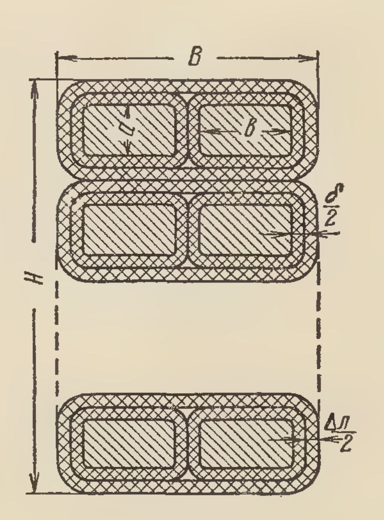


Рис. 4-39.

Таблица 4-10

тока с гильзовой изоляцией (поз. *1*, рис. VII-6)

Класс B			Класс F				
Дополнительная изоляция	Толщина дополнительной изоляции, *мм*	Общая толщина изоляции, *мм*	Марка провода	Толщина изоляции, *мм*	Дополнительная изоляция	Толщина дополнительной изоляции, *мм*	Общая толщина изоляции, *мм*
Микалента 0,1—0,13 *мм*, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4—0,5	0,85—1,0	ПСД	0,27—0,33	Стекломикалента 0,13 *мм*, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,5	0,9—1,0
Стекломикалента 0,13 *мм*, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,5	0,85—1,0	ПСД	0,27—0,33	То же	0,5	0,9—1,0
—	—	0,50	То же	0,50	—	—	0,50

Таблица 4-11

непрерывной компаундированной изоляцией (поз. *1*, рис. к табл. VII-8)

Классы E, B				
Марка провода	Толщина изоляции, *мм*	Дополнительная изоляция	Толщина дополнительной изоляции, *мм*	Общая толщина изоляции, *мм*
ПСД	0,27—0,33	Микалента толщиной 0,10—0,13 *мм* в 1/3 нахлеста	0,5	0,9—0,95
ПСД	0,27—0,33	То же	0,5	0,9—0,95
ПСД	0,27—0,33	То же	0,5	0,9—0,95

ляцией, компаундирована и опрессована (рис. 4-39).

Расчетные формулы (все размеры в миллиметрах):

$$\left.\begin{aligned} B &= (b+\delta)\,p_ш + \Delta_л + 0{,}05\,p_ш + \\ &\quad + 0{,}1\ мм; \\ H &= (a+\delta)p_в + \Delta_л\,p_в + 0{,}05\,p_в + \\ &\quad + 0{,}1\ мм, \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}8)$$

где B — размер лодочки по ширине;
H — размер лодочки по высоте;
a и b — размеры голой меди;
δ — двусторонняя толщина изоляции провода;
$p_ш$ и $p_в$ — числа витков лодочки по ширине и высоте;
0,05 — величина разбухания изоляции от компаундирования на 1 виток;
0,1 — величина разбухания изоляции от компаундирования на поверхности лодочки (налипы компаунда);
$\Delta_л$ — двусторонняя толщина дополнительной изоляции.

Для дополнительной непрерывной междувитковой изоляции, выполненной в один слой вполнахлеста из микаленты толщиной 0,1 *мм*, $\Delta_л = 0{,}4$ *мм*; при микаленте толщиной 0,13 *мм* $\Delta_л = 0{,}52$ *мм*.

2. Лодочка выполнена из прово-

да марки ППЛБО или ППТБО, компаундирована и опрессована.

Расчетные формулы (все размеры в миллиметрах):

$$\left.\begin{aligned}B&=(b+\delta)p_{ш}+0{,}075p_{ш}+0{,}1\ мм;\\H&=(a+\delta)p_{в}+0{,}075\,p_{в}+0{,}1\ мм,\end{aligned}\right\}\quad(4\text{-}9)$$

где 0,075 — величина разбухания изоляции от компаундирования на 1 виток;

0,1 — величина разбухания изоляции от компаундирования на поверхности лодочки (налипы компаунда).

При двух параллельных проводах марки ППЛБО (ППТБО) по ширине под крайние витки кладутся прокладки из электрокартона толщиной 0,2 *мм* (во избежание сдвига одного ряда проводов относительно другого); в этом случае

$$H=(a+\delta)p_{в}+0{,}075p_{в}+0{,}1+2\cdot 0{,}2\ мм.\quad(4\text{-}10)$$

Следует иметь в виду, что от выбора размеров элементарного проводника зависит форма сечения катушечной стороны обмотки. Не рекомендуется брать ширину сечения меди проводника меньше 3 *мм*; при меньшей ширине затрудняется намотка катушки вследствие взаимного смещения витков из-за незначительной площади их соприкосновения; не рекомендуется также применять тонкую медь. В противном случае может образоваться «ромбичность», т. е. искажение формы сечения катушечной стороны после компаундирования катушки с нанесенной корпусной изоляцией. При укладке «ромбичных» катушек усилия почти целиком приходятся на острые углы, что приводит к повреждениям изоляции [Л. 28].

Пример выполнения гильзовой изоляции статорных обмоток на напряжения 3 000—3 150 *в* приведен на рис. VII-6 и в табл. VII-7, а непрерывной компаундированной изоляции тех же обмоток — на рис. VII-7 и в табл. VII-8. Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжения 6 000—6 300 *в* представлена на рис. VII-7 и в табл. VII-9.

Приведенные конструкции изоляции статорных обмоток на напряжения 3 000—3 150 и 6 000—6 300 *в* обычно применяются для машин мощностью примерно до 2 000 *квт*. В случае ответственных машин и при мощности их примерно свыше 2 000 *квт* число слоев микаленты в корпусной изоляции увеличивают на один.

Для машин на напряжения 10 000—10 500 *в* число слоев микаленты в корпусной изоляции возрастает до 13—14 и 10—11 при толщине микаленты соответственно 0,13 и 0,17 *мм*, что дает общую двустороннюю толщину микалентной изоляции катушечной стороны в ее пазовой части около 7 *мм*.

При напряжениях 13 800 и 15 750 *в* числа слоев микаленты возрастают до 16—17 и 18—19 при ее толщине 0,13 *мм* или до 12—13 и 14—15 при ее толщине 0,17 *мм*; при этом общая толщина микалентной изоляции катушечной стороны составляет соответственно 8,5 и 9,5 *мм*. Для лобовой части число слоев микаленты берется на 1—2 меньше.

При напряжениях 10 000 *в* и выше для устранения ионизации (короны) в газовых прослойках между поверхностью изоляции обмотки и стенками паза поверх микалентной компаундированной изоляции накладывается один слой железистой асбестовой ленты в стык с последующим покрытием ее масляно-битумным или масляно-глифталевым полупроводящим сажным лаком. При этом вследствие контакта полупроводящего покрытия со стенками паза выравниваются их потенциалы и тем самым предотвращаются образование ионизации и озонирование между стенками паза и изоляцией катушечной стороны.

Для выравнивания распределения напряжения при выходе обмотки из паза на расстоянии 80—150 *мм* от торцов статора на катушечную сторону наносится полупроводящее покрытие также сажным лаком, но с бо̀льшим удельным поверхностным сопротивлением. Поверх покрытия для защиты его от механических повреждений и загрязнения накладывается один слой вполнахлеста пропитанной стеклянной ленты.

Толщина железистой асбестовой ленты 0,5 *мм*, а лакового покрытия 0,1 *мм*. Следовательно, толщина изоляции катушечной стороны в пазовой части увеличивается на $2 \cdot (0{,}5+0{,}1)=1{,}2$ *мм*, а в лобовой части на $2 \cdot 0{,}1=0{,}2$ *мм*.

При определении размеров паза в свету можно обратиться к рис. VII-7 и табл. VII-7 и VII-9, но при этом надо изменить, как указано, толщину микалентной изоляции (поз. *2* и *8*) и учесть толщину полупроводящего покрытия. В остальном данные по изоляции паза и лобовых частей можно взять из табл. VII-9.

Изоляция статорных обмоток крупных гидрогенераторов и турбогенераторов, так же как и изоляция плетеных (транспонированных) стержней для этих обмоток рассматривается в гл. 14.

Мы рассмотрели конструкции изоляции пазовой и лобовой частей обмоток, которые наиболее часто применяются в настоящее время. Однако работы по совершенствованию и удешевлению изоляции машин высокого напряжения постоянно продолжаются. Микалентная изоляция стоит дорого: ее стоимость составляет для крупных машин на 13 800 *в* и выше до 30—40% стоимости всех материалов машины. По-видимому, во многих случаях она может быть хотя бы частично заменена более дешевыми и менее дефицитными материалами — слюдинитом и слюдопластом. При этом большое значение могут иметь системы изоляции с применением термореактивных пропиточных полиэфирно-эпоксидных компаундов, с ленточными материалами из кремнийорганической резины и др.

е) **Изоляция обмоток фазных роторов асинхронных двигателей.** Фазные роторы асинхронных двигателей небольшой мощности обычно выполняются со всыпной обмоткой из мягких секций. Она может быть однослойной и двухслойной, так же как и всыпная обмотка для статора. В этом случае для ротора берутся полузакрытые пазы трапецеидальной или овальной формы. Конструкция изоляции такой обмотки мало чем отличается от конструкции изоляции аналогичной обмотки статора.

В последние годы на заводах Советского Союза для асинхронных двигателей на мощности от 10 до 100 *квт* (при $2p=4$) с успехом применяются фазные роторы с двухслойной петлевой обмоткой из заранее формованных жестких секций, закладываемых в открытые пазы. При этом ширина паза выбирается не свыше 6 *мм*, чтобы не получилось большого увеличения пульсационных и поверхностных потерь в зубцах статора. Те же обмотки могут быть применены и при несколько меньших мощностях двигателей. По схеме они не отличаются от двухслойных петлевых обмоток статора. Они выполняются из прямоугольных проводов марки ПБД, ПСД или ПСДК.

Конструкция изоляции роторных обмоток асинхронных двигателей мощностью до 100 *квт* представлена на рис. VII-8 и в табл. VII-10.

Обмотки роторов асинхронных двигателей мощностью свыше 100 *квт* (при $2p=4$) выполняются стержневыми из голых медных проводов с твердой гильзовой изоляцией. Они являются двухслойными волновыми обмотками. Конструкция их изоляции приведена на рис. VII-9 и в табл. VII-11.

4-7. РАЗМЕРЫ ОБМОТОК

Для расчета активного и индуктивного сопротивлений якорной обмотки необходимо предварительно определить длину ее полувитка. При конструировании машины для определения размеров корпуса статора и подшипниковых щитов надо знать длину вылета лобовой части обмотки, т. е. расстояние от торца сердечника якоря до наружной поверхности головок катушек, обращенной к подшипниковым щитам.

Полувиток обмотки состоит из прямой части, заложенной в паз и имеющей длину l_1 (для статора) или l_2 (для ротора), и лобовой части, имеющей длину $l_{л1}$ или $l_{л2}$.

Средняя длина полувитка[1]

$$l_{ср1(2)} = l_{1(2)} + l_{л1(2)}, \text{ см.} \quad (4\text{-}11)$$

Определение длины $l_{л1(2)}$ относится к «размерным» расчетам, не связанным с расчетами прочности и жесткости.

В дальнейшем приводятся эмпирические формулы для расчета $l_{л1(2)}$, точность которых в большинстве случаев можно считать достаточной при выполнении технического проекта машины.

а) **Средняя длина лобовой части обмоток статора и фазного ротора из мягких секций**

$$l_{л1(2)} = K_{л1(2)}\,\tau_{y1(2)} + 2B, \text{ см.} \quad (4\text{-}12)$$

Здесь средняя ширина секции (катушки)

$$\tau_{y1(2)} = t_{ср1(2)}\,y_{ср1(2)}, \quad (4\text{-}13)$$

где

$$t_{ср1} = \frac{\pi (D + h_{z1})}{Z_1} \quad (4\text{-}14а)$$

$$\text{или } t_{ср2} = \frac{\pi (D' - h_{z2})}{Z_2} \quad (4\text{-}14б)$$

(D, h_{z1}, Z_1 — внутренний диаметр, высота зубца и число пазов статора; D', h_{z2}, Z_2 — внешний диаметр, высота зубца и число пазов ротора); $y_{ср1(2)}$ — средний шаг в пазовых делениях, который для однослойных обмоток, кроме цепных с укороченным шагом, может быть принят равным $3q_1$ для статора и $3q_2$ для ротора, а для двухслойных обмоток

$$y_{ср1(2)} = y_{1(2)}, \quad (4\text{-}15)$$

т. е. шагу обмотки статора или ротора в пазовых делениях; величины $K_{л1}$ и B для статора следует взять из табл. 4-12, а $K_{л2}$ и B для ротора — из табл. 4-13.

Таблица 4-12

Число полюсов 2p	Лобовые части секций не изолированы			Лобовые части секций изолированы лентой		
	$K_{л1}$	$K_{в1}$	B, см	$K_{л1}$	$K_{в1}$	B, см
2	1,20	0,26	1,0	1,45	0,44	1,0
4	1,30	0,40	1,0	1,55	0,50	1,0
6	1,40	0,50	1,0	1,75	0,62	1,0
⩾8	1,50	0,50	1,0	1,90	0,72	1,0

[1] Здесь и далее все размеры в сантиметрах.

Таблица 4-13

Число полюсов 2p	$K_{л2}$	$K_{в2}$	B, см
2	1,10	0,20	1,0
⩾4	1,15	0,30	1,0

б) **Длина вылета лобовой части обмоток статора и фазного ротора из мягких секций**

$$l_{в1(2)} = K_{в1(2)}\,\tau_{y1(2)} + B, \text{ см,} \quad (4\text{-}16)$$

где $\tau_{y1(2)}$ — по (4-13); $K_{в1}$ и B — из табл. 4-12 для статора, $K_{в2}$ и B — из табл. 4-13 для ротора.

в) **Средняя длина лобовой части обмотки статора из жестких секций**

$$l_{л1} = A + 1{,}57\,H + 2M + N, \text{ см.} \quad (4\text{-}17)$$

Для определения A нужно рассчитать ряд величин. Сначала найдем среднюю ширину жесткой секции (рис. 4-40):

$$\tau_y = \frac{\pi (D + 2H + a_з)}{2p}\,\beta, \quad (4\text{-}18)$$

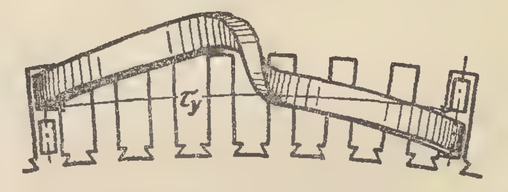


Рис. 4-40. Средняя ширина τ_y жесткой секции.

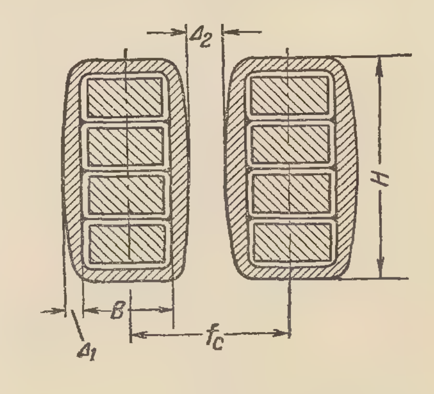


Рис. 4-41. К определению f_c.

где H (рис. 4-41) определяется в зависимости от выбранного типа обмотки и ее напряжения по одной из формул (4-6) — (4-10);

$$a_з = 2(h_2 + h_3 + h_4), \quad (4\text{-}19)$$

(размеры h_2, h_3, h_4 указаны на рис. 4-42 и 4-43; они выбираются при определении размеров паза; можно

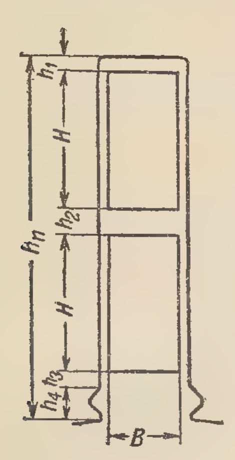


Рис. 4-42. К определению τ_y.

приближенно принять $a_3 \approx 1{,}2$; 1,8; 2,5; 3 *см* соответственно для напряжений до 690; 3 150; 6 300, 11 000 *в*);

$$\beta = \frac{y_1}{3q_1}.$$

Затем нужно определить наименьшее расстояние t_c между осями двух соседних секционных сторон при выходе их из пазов, отсчитанное по дуге окружности, проходящей по верхним граням верхнего слоя, с диаметром

$$D + a_2,$$

где

$$a_2 = 2(h_3 + h_4) \qquad (4\text{-}20)$$

($a_2 = a_3 - 2h_2$, где $h_2 \approx 0{,}2$; 0,55; 0,75; 1,1 соответственно указанным выше напряжениям).

Искомый размер (рис. 4-43)

$$t_c = \frac{\pi (D + a_2)}{Z_1}. \qquad (4\text{-}21)$$

Расстояние между осями соседних секционных сторон в отогнутых участках лобовых частей может быть определено из равенства

$$f_c = B + a_1. \qquad (4\text{-}22)$$

Здесь B (см. рис. 4-41) определяется по одной из формул (4-6) — (4-10), а размер

$$a_1 = \Delta_1 + \Delta_2, \qquad (4\text{-}23)$$

где Δ_1 — двусторонняя толщина изоляции секционной (катушечной) стороны лобовой части с учетом разбухания от пропитки или компаундирования; Δ_2 — воздушный промежуток между лобовыми частями, необходимый для их охлаждения.

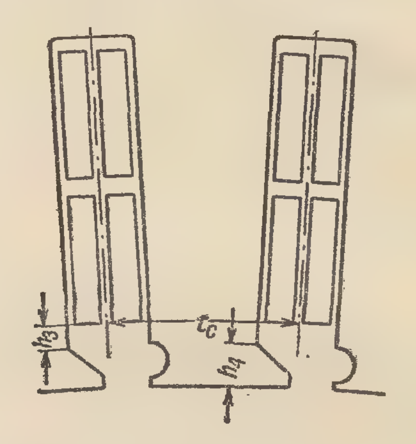


Рис. 4-43. Наименьшее расстояние t_c между соседними секционными сторонами при выходе их из пазов.

Значения Δ_1 зависят от вида примененной для лобовых частей изоляции. Они могут быть взяты из табл. VII-3—VII-9 (для 11 000 *в* $\Delta_1 \approx 0{,}75$). Значения Δ_2 рекомендуется брать из табл. 4-14.

Теперь можно рассчитать A:

$$A = \frac{\tau_y - R - 0{,}5\,H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_c}\right)^2}}, \qquad (4\text{-}24)$$

где R — радиус закругления головки лобовой части (рис. 4-44); его

Таблица 4-14

Номинальное напряжение, *в*	До 690	3 150	6 300	11 000
Размер Δ_2, *см*	0,3—0,4	0,4—0,5	0,5—0,65	0,65—1,0

(Δ_2 тем больше, чем больше мощность машины)

приближенные значения можно взять из табл. 4-15.

Таблица 4-15

Номинальное напряжение, *в*	До 690	3 150	6 300	11 000
R, см	1,2	1,3	1,5	1,65

Значения *M* приведены в табл. 4-16, в примечании значения *N*.

После подстановки в (4-17) найденных величин *A*, *H*, *M* и *N* определяется размер $l_{л1}$.

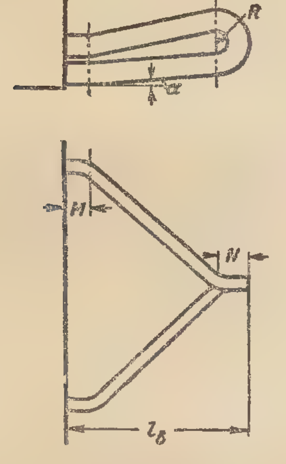


Рис. 4-44. К определению $l_{л1}$ и $l_{в1}$.

Средняя длина полувитка определяется по (4-11). Для предохранения лобовой части от повреждений при сборке и разборке машины эта часть отгибается от оси машины на угол α (рис. 4-44); обычно $\alpha = 6 \div 8°$.

г) Длина вылета лобовой части обмотки статора из жестких секций

$$l_{в1} \approx 0,5\, A\, \frac{f_c}{t_c} + M + N,\ см. \qquad (4\text{-}25)$$

Длина вылета со стороны междукатушечных и междугрупповых соединений будет больше, чем $l_{в1}$:

$$l'_{в1} \approx l_{в1} + 4B + (3 \div 6)\ см. \qquad (4\text{-}26)$$

Последний член уравнения учитывает изоляцию соединений и необходимые расстояния между ними. Он тем больше, чем выше напряжение машины и ее мощность. Расстояние от соединений или от головок катушек (считая от неизолированной меди) до бокового щита или до корпуса статора не должно быть меньше 0,8 *см* при напряжении до 690 *в* и меньше 1,6—3,0—4,5 *см* соответственно при напряжениях 3 150—6 300—11 000 *в*.

Для двухполюсных машин $l_{л1}$ и $l_{в1}$ следует взять на 5—6% больше полученных по (4-17) и (4-25).

Эмпирические формулы для $l_{л1}$ крупных гидрогенераторов и турбогенераторов приводятся в гл. 14.

д) Длина лобовой части обмотки ротора из жестких секций

$$l_{л2} = A + (10 - 15)\ см. \qquad (4\text{-}27)$$

Для определения *A* нужно сначала найти среднюю ширину секции τ_y. Ее можно брать по дуге окружности, проходящей через середины пазов ротора (рис. 4-45) и имеющей диаметр

$$D' - h_п.$$

Таблица 4-16

Длина *M* прямой части катушки от торца сердечника до начала отгиба лобовой части (рис. 4-44)

Напряжение, *в*	При глубине паза $h_п$, *см*: 4—5		5—6		6—7		7—8,5		8,5—14,0	
	при ширине паза, *см*: до 1,2		1,4—1,6		1,6—2		2—2,5		2,5—3	
	при изоляции (г — гильзовой, н — непрерывной): г	н	г	н	г	н	г	н	г	н
До 690	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	3,5	4,0	4,0	4,5
3 150	3,5	3,5	4,5	3,5	5,0	4,0	5,5	4,5	6,0	5,0
6 300	5,0	4,0	6,0	4,0	6,5	4,5	7,0	5,0	7,5	5,5
11 000	—	—	—	5,0	—	5,5	—	6,0	—	6,5

Длина головки катушки (рис. 4-44) $N = 6 \div 9,5$ *см*.

Так как нормально шаг роторной стержневой обмотки равен полюсному делению, то получаем:

$$\tau_y = \frac{\pi (D' - h_п)}{2p}. \qquad (4\text{-}28)$$

Если при петлевой катушечной обмотке фазного ротора взят укороченный шаг (что делается редко), то полученное по (4-28) значение нужно умножить на $\beta = y/3q_2$.

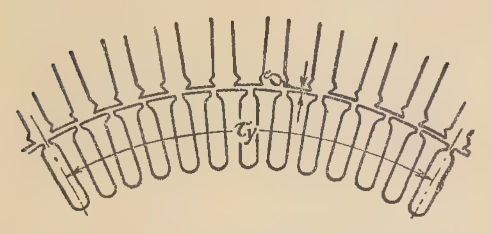


Рис. 4-45. Средняя ширина секции τ_y роторной стержневой обмотки.

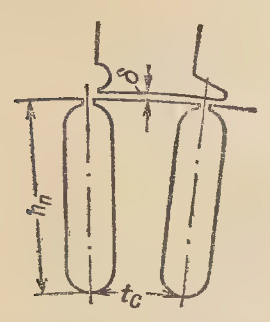


Рис. 4-46. Наименьшее расстояние t_c между соседними секционными сторонами при выходе их из пазов.

Наименьшее расстояние t_c между осями соседних секционных сторон при выходе их из пазов берется по окружности, проходящей по основаниям пазов (рис. 4-46) и имеющей диаметр

$$D' - 2h_п.$$

Следовательно, получаем:

$$t_c = \frac{\pi (D' - 2h_п)}{Z_2}. \qquad (4\text{-}29)$$

Наименьшее расстояние f_c между осями соседних секционных сторон в отогнутых участках рассчитывается по (4-22). При определении a_1 для петлевой катушечной обмотки $\Delta_1 \approx 0{,}15$ *см* при изоляции класса А и $\Delta_1 \approx 0{,}13$ *см* при изоляции класса В; $\Delta_2 \approx 0{,}10 \div 0{,}20$ *см*. Для стержневой обмотки Δ_1 из табл. VII-11; $\Delta_2 \approx 0{,}2 \div 0{,}4$ *см* (Δ_2 берется тем бо̀льшим, чем больше диаметр ротора D' и напряжение на контактных кольцах).

Теперь можно рассчитать A:

$$A = \frac{\tau_y}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_c}\right)^2}}. \qquad (4\text{-}30)$$

При определении $l_{л2}$ по эмпирической формуле (4-27) выбор второго члена ее правой части должен производиться с учетом напряжения обмотки и мощности машины.

е) Длина вылета лобовой части обмотки ротора из жестких секций

$$l_{в2} \approx 0{,}5\, A \frac{f_c}{t_c} + M + N, \text{ см}, \qquad (4\text{-}31)$$

где $M = 2{,}5 \div 6$ *см*; $N = 2{,}5 \div 4$ (тем больше, чем больше напряжение обмотки и мощность машины).

Здесь также для двухполюсных машин значения $l_{л2}$ и $l_{в2}$, полученные по (4-27) и (4-31), следует увеличить примерно на 7—8%.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ, КОМПЕНСАЦИОННЫЕ И УСПОКОИТЕЛЬНЫЕ

5-1. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки возбуждения подразделяются на параллельные (шунтовые), последовательные (сериесные) и обмотки добавочных полюсов.

1. *Катушки параллельной обмотки*, помещаемые на главных полюсах, имеют большое число витков из круглых или прямоугольных проводов небольшого сечения. В зависимости от класса изоляции выбираются следующие марки проводов:

для класса А — ПБД, ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПЭВ-2; для класса В — ПЭТВ; для классов В и F — ПСД, ПСДТ; для класса Н — ПСДК.

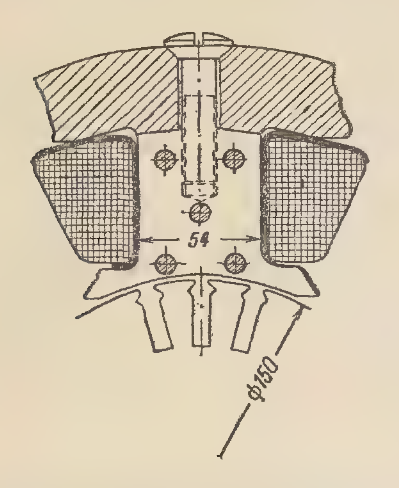


Рис. 5-1. Полюс с катушкой параллельной обмотки небольшой машины.

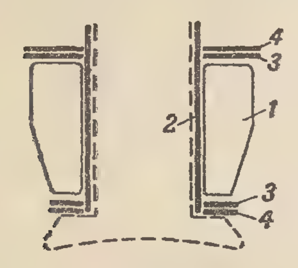


Рис. 5-2. Конструкция изоляции катушки параллельной обмотки.

В небольших машинах катушки надеваются непосредственно на полюс. Они изготовляются на специальных оправках и затем обматываются тафтяной или киперной лентой. Для изоляции катушки от сердечника полюса и станины применяют электрокартон, микафолий, стекломикафолий или формовочный миканит. Толщина изоляции на одну сторону в этом случае получается около 1,2—1,3 *мм*.

На рис. 5-1 показан полюс с катушкой такого типа.

Рекомендуется при намотке катушек для получения правильных рядов прокладывать между ними конденсаторную бумагу (класс А) или стеклоткань (классы В—Н) толщиной 0,025 *мм*.

Ранее часто для машин средней и большой мощности катушки наматывались на специальный стальной каркас, вместе с которым они надевались на полюс. Каркас изготовлялся из тонкой листовой стали толщиной 1—2 *мм*. К отогнутым бортикам приклепывались или приваривались стальные шайбы. В настоящее время такой способ изготовления катушек для нормальных машин обычно не применяется.

Типичная конструкция изоляции катушки параллельной обмотки показана на рис. 5-2. Здесь обозначают: *1* — катушку, которая обматывается снаружи тафтяной, киперной или стеклянной лентой и затем пропитывается или компаундируется; *2* — изоляцию между катушкой и полюсом, в качестве которой в зависимости от класса изоляции применяют электрокартон, микафолий или формовочный миканит; *3* — гетинаксовую (или стеклотекстолитовую) и *4* — металлическую рамки, которые служат для укрепления катушки на полюсе.

Размеры катушек и их форма определяются в зависимости от числа витков, сечения проводников, а также от наличия свободного места между полюсами. При проводниках небольшого сечения делаются скошенные катушки (см. рис. 5-1). Выполняют также катушки ступенчатой формы. При этом увеличивается наружная поверхность катушки и, следовательно, улучшаются условия ее охлаждения.

На рис. 5-3 показана катушка ступенчатой формы, подразделенная

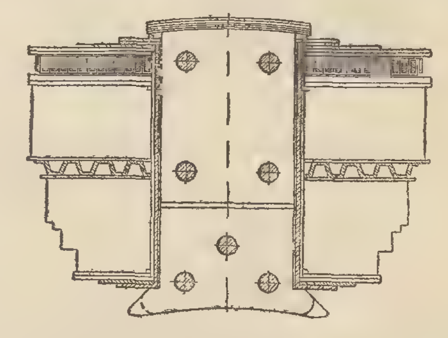


Рис. 5-3. Катушка ступенчатой формы из двух секций параллельной обмотки (в верхней части расположена катушка последовательной обмотки).

на две секции, что делается для лучшего ее охлаждения при аксиальной вентиляции. Между отдельными секциями прокладываются стальные, гетинаксовые или стеклотекстолитовые дистанционные прокладки.

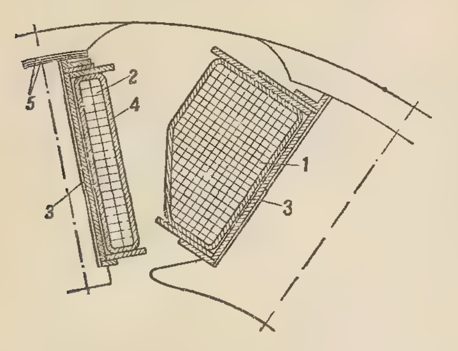


Рис. 5-4. Добавочный и главный полюсы с обмотками.

1 — катушка главного полюса; 2 — катушка добавочного полюса; 3 — электрокартон; 4 — хлопчатобумажная лента; 5 — подложенные листы картона.

вой меди на ребро или плашмя и часто из голой меди; только для небольших машин приходится применять изолированные прямоугольные или круглые проводники.

Катушки добавочных полюсов и параллельной обмотки для небольших машин при классе изоляции А показаны на рис. 5-4 и 5-5 (справа — катушки параллельной обмотки).

При выполнении катушек из голой полосовой меди для изоляции между витками обычно прокладывается асбестовая бумага толщиной 0,2—0,3 *мм*. Иногда катушки из полосовой меди выполнялись в виде растянутой спирали. В этом случае изолировались только первый и последний витки катушки хлопчатобумажной лентой. Вся катушка покрывалась лаком. На рис. 5-6 и 5-7 показаны катушки добавочных полюсов с недостаточно нагревостой-



Рис. 5-5. Катушки добавочного полюса и параллельной обмотки небольшой машины.

2. *Катушки последовательной обмотки*, также помещаемые на главных полюсах, изготовляются обычно из проводников прямоугольного сечения. При этом применяются как изолированные, так и голые (при больших сечениях) проводники. Между голыми проводниками ставятся изоляционные прокладки.

Для создания лучших условий охлаждения катушек главных полюсов в машинах со смешанным возбуждением катушки параллельной и последовательной обмоток располагаются одна над другой. Катушки последовательной обмотки обычно изготовляются в виде однорядных с одним проводником по высоте. Их изоляция от полюса выполняется так же, как для катушек параллельной обмотки.

3. *Катушки добавочных полюсов* наматываются обычно из полосо-

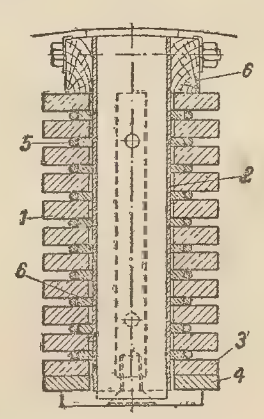


Рис. 5-6. Добавочный полюс с обмоткой большой машины.

1 — обмотка; 2 — электрокартон; 3 — хлопчатобумажная лента; 4 — «подушка» из картона; 5 — шнур; 6 — дерево.

кой изоляцией. Однако если вместо указанных материалов взять текстолит (или стеклотекстолит), микафолий (или стекломикафолий),

Таблица 5-1

Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока

Позиция на рис. 5-8	Класс А нормального исполнения			Класс В нормального и классы А и В усиленно влагостойкого исполнений			Классы F и H всех исполнений и класс В тропического и химически стойкого исполнений		
	Материал		Количество слоев	Материал		Количество слоев	Материал		Количество слоев
	наименование	толщина, *мм*		наименование	толщина, *мм*		наименование	толщина, *мм*	
1	Электрокартон ЭВ	0,2	1 между рядами	Гибкий миканит*	0,2	1 между рядами	Гибкий стекломиканит*	0,22	1 между рядами
2	То же	0,5	1	То же	0,2	2	То же	0,35	1
3	Лента киперная	0,45	1 вполнахлеста	Лента стеклянная	0,1	2 вполнахлеста	Лента стеклянная	0,1	2 вполнахлеста
4	То же	0,45	То же	То же	0,1	То же	То же	0,1	То же
5	Электрокартон ЭВ	0,2	5,5	Микафолий или миканит формовочный*	0,2 (0,5)	5,5 (2,25)	Стекломикафолий (или миканит формовочный)	0,2 (0,5)	5,5 (2,25)
6	Рамка упорная (сталь)	Не менее 1	1	Рамка упорная (сталь)	1,0	1	Рамка упорная (сталь)	1,0	—
7	Гетинакс	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит*	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит*	Не менее 1,5	1
8	То же	Не менее 1,5	1	То же	Не менее 1,5	1	То же	Не менее 1,5	1
9	То же	Не менее 6	1	То же	Не менее 6	1	То же	Не менее 6	1
10	Гетинакс	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит*	Не менее 1,5	1	Стеклотекстолит*	Не менее 1,5	1
11	Шайба пружинная (сталь)	Не менее 1	1	Шайба пружинная (сталь)	Не менее 1	1	Шайба пружинная (сталь)	Не менее 1	1
12	Провод выводной	—	—	Провод выводной	—	—	Провод выводной	—	—
13	Эскапоновая стеклоткань	0,2	1 вполнахлеста	Стеклолакоткань*	1 вполнахлеста	0,2	Стеклолакоткань*	0,15	1 вполнахлеста
14	Лента тафтяная	0,25	То же	Лента стеклянная	0,1	0,2	Лента стеклянная	0,1	То же

* Должны быть взяты материалы со связующими, соответствующими указанным классам В, F и Н.

стеклянную ленту, приведенная конструкция может найти применение.

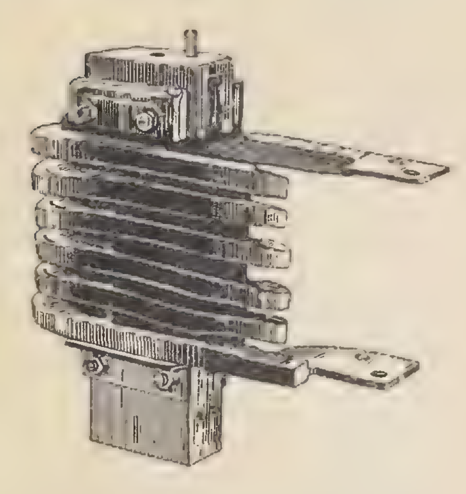


Рис. 5-7. Внешний вид добавочного полюса с обмоткой большой машины.

В дальнейшем (см. рис. 5-10 и табл. 5-3) приводится конструкция изоляции катушек добавочных полюсов современных машин большой мощности.

Для уменьшения рассеяния добавочных полюсов их катушки следует помещать как можно ближе к якорю.

Для современных машин постоянного тока наиболее часто применяются конструкции изоляции обмоток главных и добавочных полюсов, представленные на рис. 5-8 и в табл. 5-1 [Л. 27].

Приведем здесь также конструкцию изоляции обмотки главных полюсов (параллельной) и обмотки добавочных полюсов больших машин постоянного тока на напряжение до 1 000 *в* при классе изоляции В (рис. 5-9 и табл. 5-2; рис. 5-10 и табл. 5-3).

Таблица 5-2

Изоляция обмоток главных полюсов

Позиция на рис. 5-9	Назначение детали или изоляции	Материал		Число слоев на одну сторону	Односторонняя толщина изоляции, *мм*
		наименование	толщина, *мм*		
1	Изоляция сердечника полюса	Стекломикафолий	0,4	3—4	1,2—1,6
2	То же	Стеклоткань пропитанная	0,1	3	0,3
3	Прокладки на углах	Стекломиканит	0,3	—	—
4	Бандаж катушки	Стеклолента	0,1	1 (вполнахлеста)	0,2
5	Рамка изоляционная	Стеклотекстолит	8,0	1	—
6	Угольник для крепления	Сталь	3,0	1	—

Таблица 5-3

Изоляция обмоток добавочных полюсов

Позиция на рис. 5-10	Назначение детали или изоляции	Материал		Число слоев на одну сторону	Односторонняя толщина изоляции, *мм*
		наименование	толщина, *мм*		
1	Изоляция сердечника полюса	Асбестовая бумага	0,2	2	0,6
2	То же	Микафолий	0,3	5	1,5
3	Бандаж катушки	Миканит	0,5	2	1,0
4	То же	То же	0,5	2	1,0
5	Прокладка	Асбестовая бумага	0,3	2	0,6
6	Хомут для крепления	Сталь	.2,0	1	—

Согласно основному ГОСТ на электрические машины выводы обмоток машин постоянного тока должны иметь обозначения, указанные в табл. 5-4.

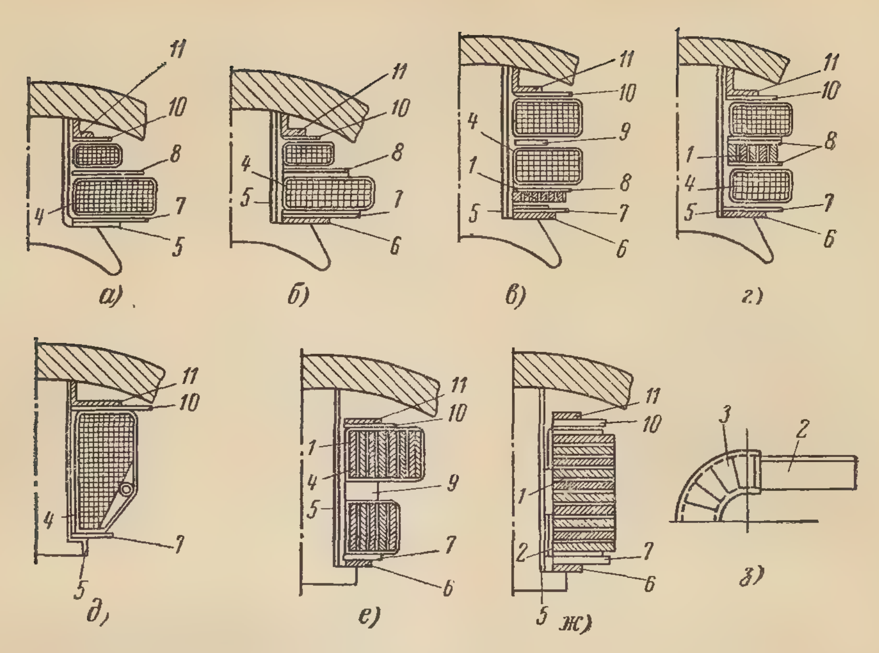


Рис. 5-8. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов (различные варианты).

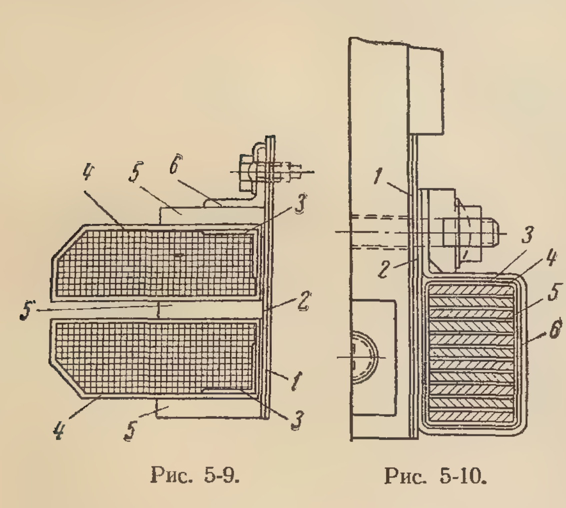


Рис. 5-9. Рис. 5-10.

Таблица 5-4

Наименование выводов обмотки	Обозначения выводов	
	начало	конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Параллельная и независимая обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Компенсационная обмотка .	К1	К2

5-2. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ОБМОТКИ

Компенсационные обмотки обычно применяются для больших машин на мощности примерно от 400—600 *квт* и более. Для таких машин они выполняются в виде стержневых обмоток.

Секционные и катушечные компенсационные обмотки [Л. 89], выполненные по типу статорных обмоток машин переменного тока, здесь не рассматриваются. Они применяются главным образом в машинах специального назначения, для которых может оказаться целесообразным их применение при мощности 100—400 *квт*, например для двигателей с широким диапазоном регулирования скорости вращения путем изменения тока возбуждения.

Для компенсационной обмотки выбираются голые стержни прямоугольного сечения, которые изолируются и вставляются с торца в полузакрытые пазы полюсного наконечника.

Лобовые части обмотки выполняются в виде дуг из шинной меди без особой изоляции.

Способы соединения дуг со стержнями показаны на рис. 5-11.

Болтовые соединения (рис. 5-11, *в*) применяются в местах разъема станины.

Стержни и дуги обычно имеют большие сечения. Для очень мощных машин компенсационную обмотку иногда приходится выполнять с параллельными ветвями. Однако

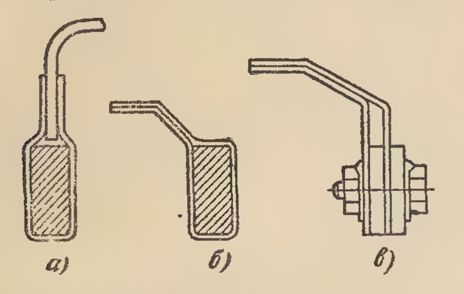


Рис. 5-11. Соединения дуг со стержнями компенсационной обмотки.

а — паяное с хомутиком; *б* — паяное без хомутика; *в* — болтовое.

ограничиваются только двумя параллельными ветвями: $a_к=2$. При большом $a_к$ было бы трудно обеспечить равномерное распределение тока по параллельным ветвям из-за влияния контактных сопротивлений. По этой же причине схема компенсационной обмотки при $a_к=2$ выполняется, как показано на рис. 5-12. Здесь обмотка добавочных полюсов также имеет две параллельные ветви.

Конструкция изоляции стержней компенсационной обмотки приведена на рис. 5-13 и в табл. 5-5.

5-3. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Эти обмотки выполняются, так же как для машин постоянного тока,

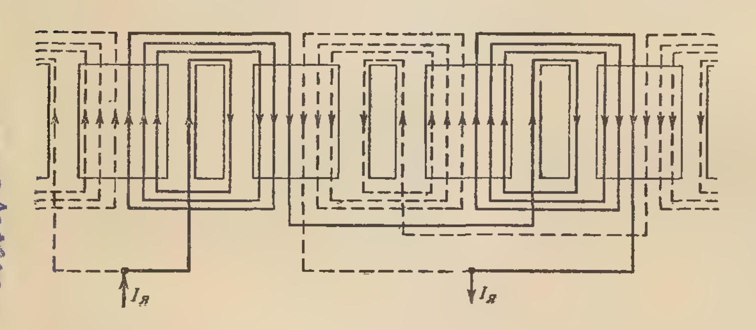


Рис. 5-12. Схема компенсационной обмотки с двумя параллельными ветвями.

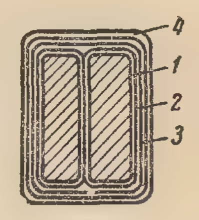


Рис. 5-13.

Таблица 5-5

Изоляция стержней компенсационной обмотки. Класс изоляции В. Напряжение до 1 000 *в*

Позиция на рис. 5-13	Материал: наименование	Материал: толщина, *мм*	Количество слоев	Толщина изоляции, *мм*: по высоте	по ширине при числе стержней в пазу: 2	по ширине при числе стержней в пазу: 3
1	Микалента	0,13	1 вполнахлеста	0,52	0,52	1,04
2	Микафолий	0,15	$3^1/_4$ оборота	0,9	1,05	1,05
3	Бумага телефонная лакированная	0,05	5 оборотов	0,5	0,5	0,5
4	Обертка пропитанным электрокартоном	0,2	—	0,4	0,4	0,4
	Допуск на укладку	—	—	0,38	0,43	0,51
	Всего на паз	—	—	2,7	2,9	3,5

Примечание. При одном стержне в пазу микалента (*1*) исключается, число слоев микафолия (*2*) и бумаги телефонной (*3*) увеличивается на 1.

Таблица 5-6

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 *квт*

Позиция на рис. 5-14	Классы А и В нормального исполнения			Классы А и В усиленно влагостойкого исполнения			Классы F и H всех исполнений и класс В химическистойкого и тропического исполнений		
	Наименование материала	Толщина, *мм*	Количество слоев	Наименование материала	Толщина, *мм*	Количество слоев	Наименование материала	Толщина, *мм*	Количество слоев
1	Слюдинитофолий	0,12	16	Микафолий (или формовочный миканит)	0,2 (0,5)	8 (3)	Стекломикафолий (или формовочный миканит)	0,2 (0,5)	8 (3)
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык
3	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1
4	Гетинакс	3—5	1	Гетинакс	3—5	1	Стеклотекстолит	3—5	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками
6	Слюдинит гибкий	0,2	1 между слоями	Миканит гибкий	0,2	1 между слоями	Гибкий стекломиканит	0,22	1 между слоями
7	Бумага конденсаторная	0,03	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же

Примечание. Материалы миканиты, стекломикафолий, стеклотекстолит должны иметь связующие, соответствующие выбранному классу изоляции.

в виде катушек, расположенных на сердечниках полюсов ротора.

Катушки ротора небольших машин (примерно до 100 *квт* при $2p=4$) обычно наматываются непосредственно на изолированные сердечники полюсов. Как правило, витки их образуют несколько слоев по ширине и несколько рядов по высоте. В этом случае для них применяются изолированные провода круглых или прямоугольных сечений марок ПБД, ПСД, ПСДК соответственно выбранному классу нагревостойкости.

Иногда для машин мощностью 50—100 *квт* выбираются однослойные катушки. Они получаются путем намотки на ребро голой полосовой меди с изоляционными прокладками между витками.

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 *квт* представлена на рис. 5-14 и в табл. 5-6.

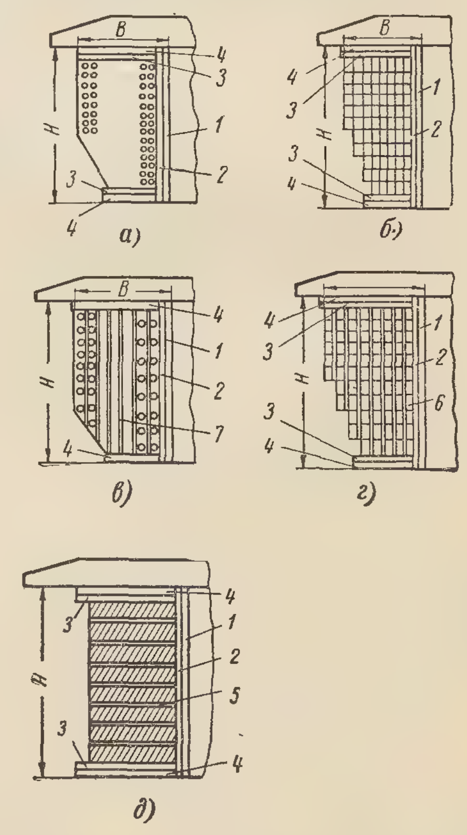


Рис. 5-14. Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 *квт* (*а—д* — катушки различного исполнения).

При эксплуатации машины и в процессе изготовления катушек их изоляция подвергается значительным механическим воздействиям. Поэтому она должна быть механически достаточно прочной. Толщину изоляции между катушкой и сердечником полюса не следует брать меньше 1,2 *мм*. Для создания монолитности катушки следует в процессе ее намотки каждый слой промазывать пастой (изготовляется обычно на основе эмали с добавлением небольшого количества прокаленного асбестового волокна). При этом после сушки катушка становится не только монолитной, но и более влагостойкой.

Наиболее прочной получается однослойная катушка (рис. 5-14, *д*). Условия охлаждения для нее лучше, чем у других катушек, так как она имеет с одной стороны оголенную поверхность. Нагрев по проводникам здесь распределен более равномерно. Поэтому для обмоток возбуждения из таких катушек допускается большее превышение температуры (см. табл. 11-1).

Для машин мощностью примерно свыше 100 *квт* в настоящее время применяются обмотки возбуждения из однослойных катушек. Изоляция их должна быть более надежной. Между витками катушки также прокладывается асбестовая бумага толщиной 0,3 *мм* (для повышения надежности, особенно в машинах большой мощности, рекомендуется прокладывать два слоя такой бумаги толщиной 0,2 *мм*).

После сушки («запечки»), опрессовывания и рихтовки катушка надевается на изолированный сердечник полюса. От полюсного наконечника и ярма ротора она изолируется изоляционными шайбами толщиной около 10 *мм*.

Изоляция катушек ротора явнополюсных машин мощностью свыше 100 *квт* представлена на рис. 5-15 и в табл. 5-7.

Таблица 5-7

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 *квт*

Позиция на рис. 5-15	Материал		Количество слоев	Общая толщина на сторону, *мм*	Примечание
	наименование	толщина, *мм*			
1	Медь полосовая	—	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для классов А, Е и В применяется лакировка глифтальбакелитовым лаком, для классов F и H — лаком на кремнийорганической основе
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнениях применять только стекломикафолий или формовочный миканит
4,6 5 7	Миканит прокладочный Стеклотекстолит То же	0,5 5,0 Не менее 8,0	1 1 1	0,5 5,0 8,0	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой. Для класса А нормального исполнения вместо стеклотекстолита применяется гетинакс

Намотка полосовой меди на ребро представляет некоторые затруднения и требует наличия специальных гибочных станков. Однако преимущества катушек такого выполнения настолько значительны, что они в настоящее время получили преобладающее применение.

В том случае, когда между соседними полюсами недостаточно места для размещения обмотки, катушки выполняются ступенчатой

формы. Витки, расположенные ближе к ободу ротора, делают из меди меньшей ширины, чем витки в верхней части катушки, но сечение при этом оставляют одинаковым. На

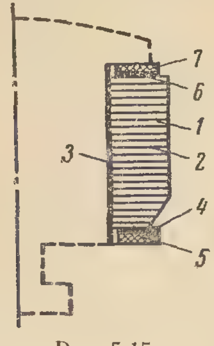


Рис. 5-15.

рис. 5-16 показана ступенчатая катушка. Место стыка широкой и узкой меди пропаивается серебром.



Рис. 5-16. Ступенчатая катушка возбуждения.

При недостаточности места между полюсами применяют и другой способ изготовления катушки. Катушка наматывается целиком из меди одного сечения. Затем часть витков на известной высоте срезается по их ширине. Катушка со срезанными нижними витками показана на рис. 5-17.

Иногда в машинах большой мощности для увеличения поверхности охлаждения катушек им в торцевой (лобовой) части придают гребенчатое очертание. Витки в этом случае через один делают по длине больше соседних. Профиль лобовой части такой катушки показан на рис. 5-18.

Все катушки возбуждения наматываются в одну сторону и соединяются последовательно. Соединения катушек показаны на рис. 5-19.

При больших окружных скоростях ротора под действием центробежных сил витки катушки могут выпучиваться, а соединительные пластины между катушками изгибаться. Для того чтобы этого не было, между катушками устанавливаются распорки, а соединительные пластины укрепляются жесткими ге-

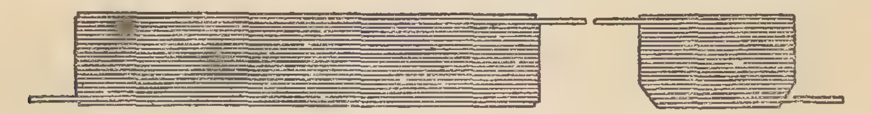


Рис. 5-17. Катушка возбуждения со срезанными краями.

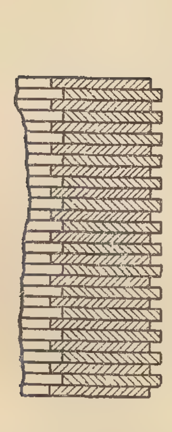


Рис. 5-18. Лобовая часть катушки с выступающими витками.

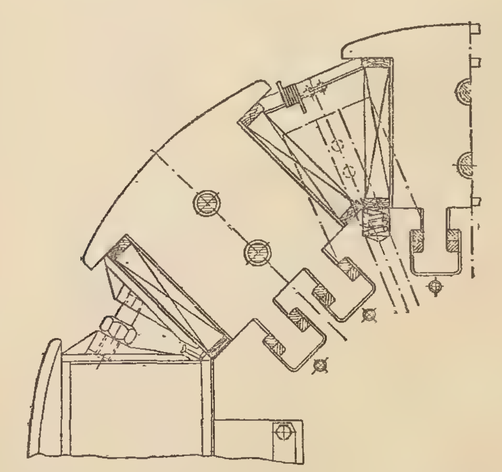


Рис. 5-19. Ротор с обмоткой синхронной машины.

тинаксовыми пластинами. Распорки и укрепляющие пластины показаны на рис. 5-19. Показанная на этом рисунке конструкция применяется в машинах средних размеров. В крупных машинах распорки крепятся к ободу ротора специальными шпильками, так же как и соединительные пластины.

После заклинивания полюса на роторе катушка возбуждения должна быть плотно прижата к ободу ротора и полюсному наконечнику. Для этого под нижние изоляционные шайбы подкладываются выравнивающие дистанционные шайбы из электрокартона.

С течением времени возможно некоторое ослабление катушки на полюсе. В больших машинах, для того чтобы этого избежать, в специальные гнезда обода ротора закладываются пружины, прижимающие изоляционные шайбы. Таких пружин ставят две — четыре по длине обода. Одна из них показана на рис. 5-19.

Выполнение и изоляция обмоток возбуждения неявнополюсных синхронных машин (турбогенераторов) рассматриваются в гл. 14.

5-4. УСПОКОИТЕЛЬНЫЕ ОБМОТКИ

В синхронных двигателях успокоительные обмотки служат также в качестве пусковых. Они выполняются обычно из круглых медных, латунных или бронзовых стержней, заложенных в соответствующие пазы полюсных наконечников. На торцевых частях выступающие концы стержней соединяются короткозамыкающими пластинами. Часть ротора синхронного двигателя с пусковой обмоткой показана на рис. 5-20.

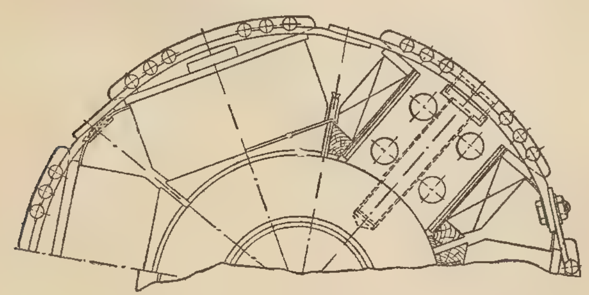


Рис. 5-20. Ротор синхронного двигателя с пусковой (успокоительной) обмоткой.

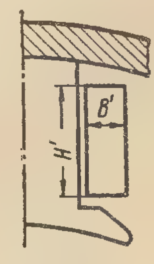


Рис. 5-21.

5-5. РАЗМЕРЫ ОБМОТОК

Габаритные размеры катушки обмотки возбуждения вместе с изоляцией необходимо найти для определения площади поперечного сечения промежутка между катушками соседних полюсов. При этом проверяется правильность выбора формы сечения катушки и устанавливаются окончательные размеры полюсного сердечника: его ширина b_m и высота h_m (целесообразно начертить масштабный эскиз полюсов и катушек).

Площадь, занимаемая катушкой вместе с изоляцией, зависит от сечения проводника, числа ее витков и толщины изоляции между катушкой и частями полюса и ярма. При определении этой площади нужно учитывать разбухание изоляции изолированных проводников от пропитки или промазки.

Сначала обратимся к катушкам обмоток возбуждения машин постоянного тока. Если выбрана прямоугольная форма сечения катушки, то площадь, занимаемая изолированными проводниками, определяется размерами (рис. 5-21):

$$H' = (d_{из} + 0{,}1)\, p_в, \text{ мм}; \quad (5\text{-}1а)$$

$$B' = (d_{из} + 0{,}2)\, p_ш, \text{ мм}, \quad (5\text{-}1б)$$

где $d_{из}$ — диаметр изолированного проводника (при прямоугольном проводнике вместо $d_{из}$ нужно подставить в формулы размеры сторон изолированного проводника $b_{из}$ и $a_{из}$; обычно по высоте катушки рас-

полагается бо́льшая сторона $b_{из}$); 0,1 и 0,2 *мм* вводятся в формулы для учета увеличения размеров изолированного проводника вследствие разбухания от пропитки или промазки; $p_в$ и $p_ш$ — числа проводников катушки по высоте и ширине.

При определении габаритных размеров катушки к H' и B' прибавляются толщины изоляции между катушкой и частями полюса и ярма, указанные в табл. 5-1 и на рис. 5-8.

Если катушка разделена, например, на две части, то размеры этих частей определяются по тем же формулам (5-1а) и (5-1б).

Для катушки со скошенными краями (см. рис. 5-8, *д*) высота H' определяется по формуле (5-1а); для определения размеров по ширине скошенной и нескошенной частей может быть использована формула (5-1б) для B', причем для скошенной части надо взять 3—4 слоя и рассчитать их ширину по (5-1б), изменив соответственно $p_ш$.

При определении размера B' катушек с прокладками между слоями (см. рис. 5-8, *е*) нужно учесть толщину этих прокладок.

Для однослойной катушки из голой полосовой меди, гнутой на ребро (рис. 5-8, *ж*), ширина B' равна ширине меди, а высота

$$H' = (a + 0{,}1)\,p_в + \Delta_п (p_в - 1),\ мм, \qquad (5\text{-}2)$$

где $\Delta_п$ — толщина прокладки; 0,1 *мм* вводится для учета утолщений на углах, которые остаются после опрессовывания.

Для катушки из полосовой меди (ленты), гнутой на ребро, не следует выбирать слишком большим отношение размеров меди b/a. Опыт показывает, что это отношение не должно быть больше 20:

$$\frac{b}{a} \leqslant 20. \qquad (5\text{-}3)$$

В то же время наименьший радиус закругления по внутренней кромке R (рис. 5-22) для катушки, выполненной из полосовой меди, гнутой на ребро, согласно опытам зависит от b и a следующим образом:

$$R \geqslant \frac{0{,}05\, b^2}{a}. \qquad (5\text{-}4)$$

Если в (5-4) подставить a из (5-3), взяв предельно допустимое значение b/a, то получим:

$$R \geqslant b. \qquad (5\text{-}5)$$

Следовательно, радиус закругления витка не должен быть меньше ширины меди b.

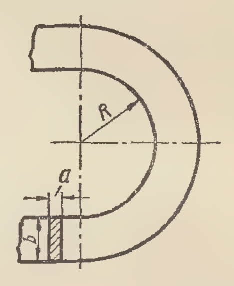


Рис. 5-22. Гнутая часть витка из полосовой меди.

Размеры катушки ротора явнополюсной синхронной машины рассчитываются по тем же формулам (5-1а) и (5-1б) или для H' по (5-2), а при определении ее габаритных размеров толщины изоляции между катушкой и частями полюса и ярмом ротора должны быть взяты из табл. 5-6 или 5-7.

При уточненных расчетах размеров катушки иногда приходится учитывать допустимые отклонения (допуски) размеров проводов (d, a, b) и толщин изоляционных материалов от их номинальных значений. Эти допуски, например, для медных круглых проводов при $d = 0{,}26 \div 4{,}1$ *мм* равны $\pm(0{,}010—0{,}040)$ *мм*, а для прямоугольных проводов при $b = 1{,}25 \div 9{,}30$ *мм* $\pm(0{,}03—0{,}07)$ (то же для размера a). В худшем случае, когда, например, плюсовые допуски приводят к уменьшению внутренних размеров катушки, это уменьшение по ее ширине обычно не превышает десятых долей миллиметра (допускается до 1 *мм*).

В обычных случаях размеры катушек можно определять без учета указанных допусков.

Приведем формулы, по которым рассчитывается средняя длина витка обмотки возбуждения $l_{в.ср}$, очевидно равная средней длине витка катушки (все размеры в сантиметрах).

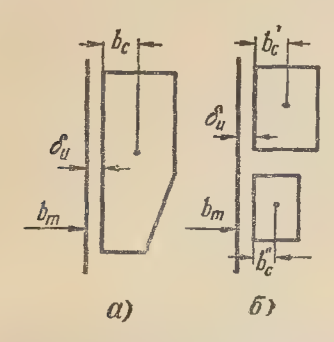


Рис. 5-23. К определению средней длины витка катушки.

Средняя длина витка многослойной катушки

$$l_{в.ср} = 2(l_m + b_m) + 2\pi(b_c + \delta_{из} + r), \text{ см}, \quad (5\text{-}6)$$

где l_m и b_m — размеры сечения сердечника полюса;

b_c — расстояние от центра тяжести сечения катушки до ее внутренней поверхности (рис. 5-23, *а*);

$\delta_{из}$ — толщина изоляции между катушкой и сердечником полюса (по табл. 5-1 и 5-6);

r — радиус закругления катушки по углам (от центра до внутренней кромки катушки).

Радиус r для многослойных катушек из круглых проводов или прямоугольных, намотанных на широкую сторону, можно принять равным 0,3—1,0 *см*: тем бо́льшим, чем больше размеры проводника d или a.

Если катушка состоит из двух различных секций с числами витков w' и w'' и расстояниями от центров тяжести их сечений до внутренних кромок b'_c и b''_c (рис. 5-23, *б*) то в (5-6) следует подставить

$$b_c = \frac{b'_c w' + b''_c w''}{w' + w''}, \text{ см}. \quad (5\text{-}7)$$

В случае однослойных катушек из полосовой меди, намотанной на ребро, при лобовой части в виде полуокружности

$$l_{в.ср} = 2l_m + \pi(b_m + 2\delta_и + b), \text{ см}, \quad (5\text{-}8)$$

где b — размер полосовой меди по ширине, *см*.

Для тех же катушек, но при двух закруглениях в лобовой части (для больших синхронных машин при $b_m > 20$ *см*)

$$l_{в.ср} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + \delta_и + b), \text{ см}, \quad (5\text{-}9)$$

где r — радиус закругления витка по углам в лобовой части.

Обычно $r \approx b$, но не должно быть $r < b$ [см. (5-5)].

ГЛАВА ШЕСТАЯ
РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи электрической машины заключается в определении намагничивающей силы* (н. с.), необходимой для создания в воздушном зазоре машины магнитного потока, могущего навести в обмотке якоря заданную э. д. с.

Картина распределения магнитного поля в электрической машине в пределах ее сектора AOB (рис. 6-1) для всех таких секторов одинакова. Поэтому для определения н. с., создающей магнитный по-

* Намагничивающую силу называют также магнитодвижущей силой (м. д. с.).

ток, достаточно ограничиться расчетом магнитного поля в пределах одного сектора, т. е. в пределах одной пары полюсов. Обозначим искомую н. с. через $F_{цепи}$. Она, как известно, для любого замкнутого контура магнитной силовой линии определяется равенством

$$\oint H\,dl = F_{цепи}, \qquad (6\text{-}1)$$

где H — напряженность поля в направлении dl (правая часть равенства — полный ток внутри рассматриваемого контура).

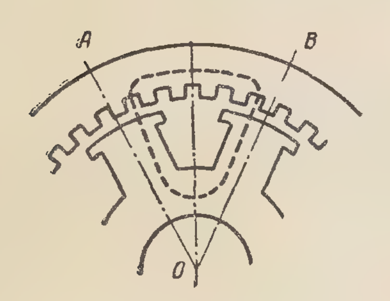


Рис. 6-1. Магнитная цепь электрической машины.

При расчете выбирается контур, проходящий через минимальный воздушный зазор машины.

Интеграл $\oint H\,dl$ заменяется суммой $\Sigma H_x l_x$, а отдельные участки магнитной цепи длиной l_x выбираются таким образом, чтобы H_1, H_2... вдоль этих участков можно было считать приблизительно постоянным. При этом (6-1) заменяется равенством

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n = \\ = F_{цепи}. \qquad (6\text{-}2)$$

Левая часть этого равенства представляет собой сумму магнитных напряжений и измеряется в амперах, если подставить H_x *а/см* и l_x *см*.

Равенство (6-2) можно написать в следующем виде:

$$F_1 + F_2 + \cdots + F_n = F_{цепи}. \qquad (6\text{-}3)$$

Здесь $F_x = H_x l_x$, т. е. F_x равно магнитному напряжению какого-либо участка магнитной цепи ($x = 1, 2, ..., n$).

Магнитная цепь электрической машины разделяется на следующие участки: 1) воздушный зазор; 2) зубцы (или полюс) ротора; 3) ярмо ротора; 4) зубцы (или полюс) статора; 5) ярмо статора.

Расчет н. с. $F_{цепи}$ производится в таком порядке: по э. д. с., которая должна наводиться в обмотке якоря, находится магнитный поток Φ; по размерам машины находится сечение S_x для каждого участка магнитной цепи; затем определяется индукция в каждом участке:

$$B_x = \frac{\Phi}{S_x}; \qquad (6\text{-}4)$$

по значению B_x, пользуясь кривыми намагничивания* для соответствующего материала, находят H_x и $H_x l_x$; наконец, просуммировав магнитные напряжения всех участков, получают н. с. $F_{цепи}$.

Наибольшее магнитное напряжение при холостом ходе и магнитном потоке, соответствующем $E = U_н$, приходится обычно на воздушный зазор (60—90% $F_{цепи}$).

6-1. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Магнитное напряжение воздушного зазора при гладком якоре пропорционально индукции в воздушном зазоре B_δ и длине 2δ (в рассматриваемом замкнутом контуре магнитной линии воздушный зазор встречается 2 раза):

$$F_\delta = 2H_\delta \delta = 2 \cdot 0{,}8\, B_\delta \delta = \\ = 1{,}6\, B_\delta \delta; \qquad (6\text{-}5)$$

здесь

$$H_\delta = \frac{B_\delta \cdot 10^{-8}}{\mu_0}; \ \mu_0 = 0{,}4\,\pi \cdot 10^{-8}, \textit{гн/см}$$

при B_δ в гауссах.

Значение B_δ определяется по формуле

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta}, \qquad (6\text{-}6)$$

* Удобнее при расчетах пользоваться вместо кривых таблицами намагничивания (см. приложение II).

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению расчетной длины полюсной дуги b_δ к полюсному делению τ:

$$\alpha_\delta = \frac{b_\delta}{\tau}; \qquad (6\text{-}7)$$

l_δ — расчетная длина якоря.

Значение b_δ определяется по кривой распределения индукции

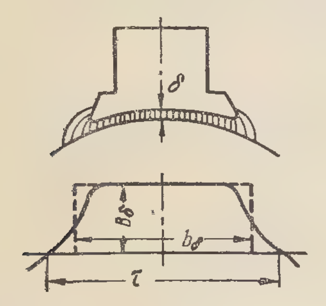


Рис 6-2. Кривая поля машины (к определению b_δ).

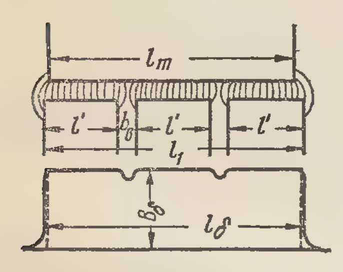


Рис. 6-3. К определению l_δ.

в воздушном зазоре вдоль окружности якоря (кривая поля машины), а l_δ — по кривой распределения индукции вдоль длины машины (рис. 6-2 и 6-3) *.

Для *машин постоянного тока* небольшой мощности, так же как для машин с компенсационной обмоткой, воздушный зазор под полюсом иногда делается равномерным. В этом случае можно приближенно принять:

$$b_\delta \approx b_р + 2\delta, \ см, \qquad (6\text{-}8)$$

где $b_р$ — действительная длина полюсной дуги.

При скошенном полюсном наконечнике примерно на длине $\frac{1}{6} b_р$ с каждого его края и при зазорах по его концам, равных приблизительно 2δ, можно считать:

$$b_\delta \approx b_р, \ см. \qquad (6\text{-}8а)$$

Расчетную длину якоря можно принять равной:

$$l_\delta = 0{,}5\left(l_р + l\right), \ см, \qquad (6\text{-}9)$$

где $l_р$ — длина полюсного наконечника по оси;

l — длина якоря без радиальных вентиляционных каналов.

Последняя определяется по формуле

$$l = l_1 - n_в b_в, \qquad (6\text{-}10)$$

где l_1 — полная длина якоря, которая часто выбирается на несколько миллиметров больше $l_р$ для уменьшения потерь в стальных торцевых частях якоря и магнитного осевого тяжения при сдвиге якоря по оси;

$n_в$ — число каналов;

$b_в$ — ширина канала.

В последние годы для машин постоянного тока без компенсационной обмотки иногда выбирается «эксцентричный» зазор с целью снизить максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами (например, для двигателей с широкими пределами регулирования скорости вращения путем изменения возбуждения, а также для тяговых двигателей большой мощности). Такой зазор получается, если дуга полюсного наконечника очерчивается радиусом, превышающим радиус концентричной по отношению к якорю окружности настолько, чтобы зазоры под краями полюсного наконечника были в 2—3 раза больше, чем под его серединой. В этом случае расчетная дуга b_δ определяется с учетом насыщения зубцов по кривой поля в зазоре, построенной по картине распределения магнитных силовых линий [Л. 50]. Расчеты по такому методу довольно кропотливы. При приближенных расчетах можно принять $b_\delta \approx b_р$, но при этом для определения магнитного напряжения воздушного зазора следует взять расчетный зазор

$$\delta_р \approx \delta + \frac{1}{6}(\delta_м - \delta), \qquad (6\text{-}10а)$$

где δ — зазор под серединой полюсного наконечника и $\delta_м$ — зазор под его краями.

* Кривые поля при холостом ходе машин постоянного тока и синхронных могут быть найдены из построения индукционных трубок поля при заданных размерах воздушного зазора и конфигурации полюсного наконечника (см., например, [Л. 2 и 14]).

Для *асинхронных машин* нормального исполнения кривая поля в воздушном зазоре вследствие насыщения стальных участков магнитной цепи отличается от синусоиды, делаясь «уплощенной». Поэтому коэффициент α_δ, называемый здесь также «коэффициентом уплощения», получается больше, чем $2/\pi$, что мы имели бы для синусоиды.

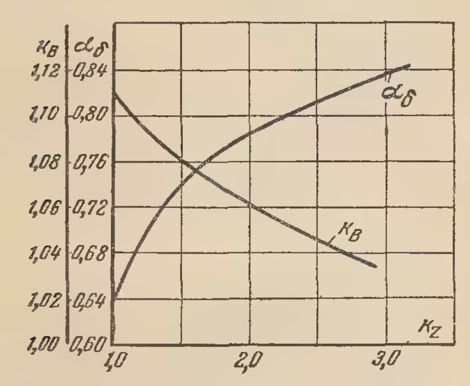


Рис. 6-4. Кривые $\alpha_\delta = f(k_z)$ и $k_B = f(k_z)$ для асинхронных машин

Уплощение кривой поля, а следовательно, и значение α_δ зависят главным образом от насыщения зубцов статора и ротора: α_δ тем больше, чем больше коэффициент насыщения зубцов:

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}, \qquad (6\text{-}11)$$

где F_δ — магнитное напряжение воздушного зазора;

F_{z1} и F_{z2} — магнитные напряжения зубцов статора и зубцов ротора.

На рис. 6-4 представлена кривая, выражающая зависимость α_δ от k_z. Значения α_δ определены по кривым полей, построенным для большого числа асинхронных машин. На том же рисунке представлена кривая $k_B = f(k_z)$. Значения коэффициента k_B используются при определении потока Ф.

Расчетная длина якоря (статора) l_δ может быть принята равной длине пакетов якоря при $\delta < 1{,}5$ *мм*:

$$l_\delta = l_1 - n_в b_в. \qquad (6\text{-}12)$$

Если $\delta \geqslant 1{,}5$ *мм*, то следует l_δ определять по формуле

$$l_\delta = l_1 - n_в b'_в, \qquad (6\text{-}13)$$

где $b'_в$ можно взять из табл. 6-1.

Таблица 6-1

δ, *мм*	1,5	1,75	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
$b'_в$ при $b_в = 10$ *мм*	7,4	7,1	6,8	6,3	5,8	5,5	5,1
$b'_в$ при $b_в = 15$ *мм*	12,4	12,0	11,7	11,0	10,4	9,8	9,3

Для *явнополюсных синхронных машин* форма кривой поля зависит от формы очертания полюсного наконечника, длины полюсной дуги $b_р$, от отношения зазора к полюсному делению δ/τ и в небольшой степени от насыщения стали, так как воздушный зазор в этих машинах берется относительно большой. Длина полюсной дуги выбирается в пределах $(0{,}55 \div 0{,}75)\tau$, причем меньшие значения обычно берутся для небольших диаметров и чисел полюсов. Последнее объясняется необходимостью уменьшить высоту полюсного наконечника в его средней части, которая, например, при $2p = 4$ сильно зависит от отношения $b_р/\tau$, и тем самым увеличить высоту сердечника полюса. Для тихоходных машин не следует брать $b_р/\tau > 0{,}75$, так как при большем значении $b_р/\tau$ может сильно возрасти рассеяние между концами полюсных наконечников.

Обычные выполнения полюсного наконечника показаны на рис. 6-5 и 6-6. Форма очертания полюсного наконечника по рис. 6-5 соответствует приблизительно синусоидальной кривой поля в пределах полюсной дуги. Чтобы сделать более простым изготовление штампа для полюса синхронной машины, очертание по-

люсного наконечника выбирается по дуге радиуса R_p (рис. 6-5), который можно вычислить по следующей формуле:

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_м - \delta)}{b_p^2}}, \; см, \quad (6\text{-}14)$$

где D — внутренний диаметр статора;

b_p — длина полюсной дуги;

$\delta_м$ — воздушный зазор под краями полюсного наконечника.

Для нормальных синхронных машин обычно выбирается $\delta_м = (1{,}5 \div 2{,}0)\,\delta$, что дает кривую поля, достаточно близкую к синусоиде.

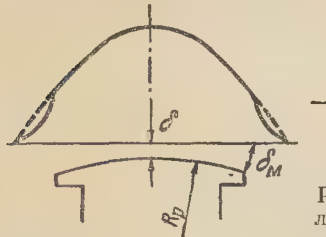


Рис. 6-5. Полюсный наконечник для получения приблизительно синусоидальной кривой поля.



Рис. 6-6. Полюсный наконечник для получения приблизительно прямоугольной кривой поля.

При выполнении полюсного наконечника по рис. 6-6 получается приблизительно прямоугольная кривая поля. Такие полюсные наконечники применяются сравнительно редко и только для небольших машин (<50 *ква*).

Значения α_δ и k_B для явнополюсных машин представлены на рис. 6-7, 6-8а и 6-8б в зависимости от $\alpha_p = b_p/\tau$. Они были определены по кривым полей, найденным по картинам распределения магнитных силовых линий в воздушном зазоре. При этом не учитывалось влияние насыщения зубцов на кривую поля, что справедливо для равномерного зазора (при $\delta_м/\delta = 1$). При $\delta_м/\delta > 1$ насыщение зубцов несколько уплощает кривую поля и, следовательно, приводит к увеличению α_δ. Однако при обычных насыщениях зубцов и значениях δ синхронных машин коэффициенты α_δ и k_B с некоторым

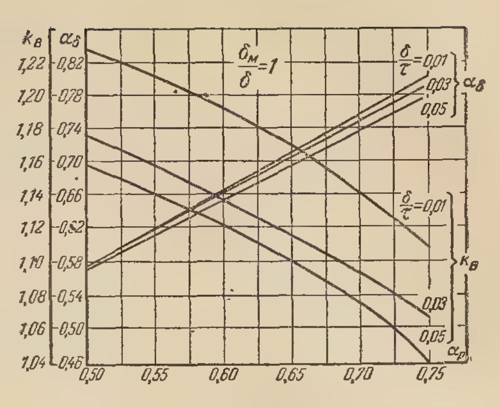


Рис. 6-7. $\alpha_\delta = f(\alpha_p)$ и $k_B = f(\alpha_p)$ для синхронных машин с полюсным наконечником по рис. 6-6 при $\delta_м/\delta = 1$ и различных значениях δ/τ.

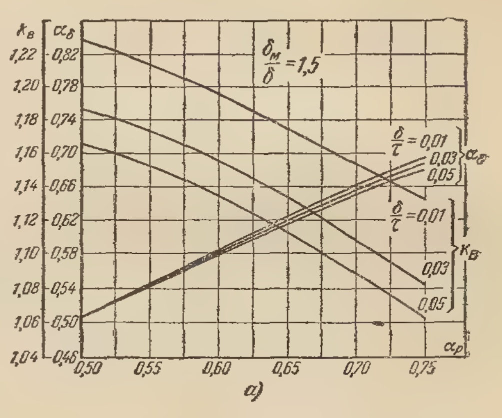


Рис. 6-8а. $\alpha_\delta = f(\alpha_p)$ и $k_B = f(\alpha_p)$ для синхронных машин с полюсным наконечником по рис. 6-5 при $\delta_м/\delta = 1{,}5$ и различных значениях δ/τ.

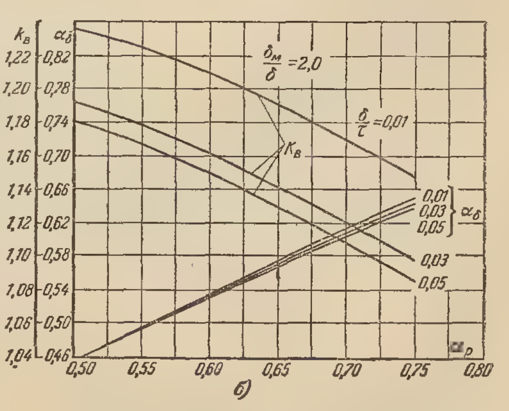


Рис. 6-8б. $\alpha_\delta = f(\alpha_p)$ и $k_B = f(\alpha_p)$ для синхронных машин с полюсным наконечником по рис. 6-5 при $\delta_м/\delta = 2$ и различных значениях δ/τ.

приближением можно брать из кривых рис. 6-7 и 6-8.

Расчетная длина l_δ для синхронной машины может быть определена, так же как для машины постоянного тока, по (6-9) *.

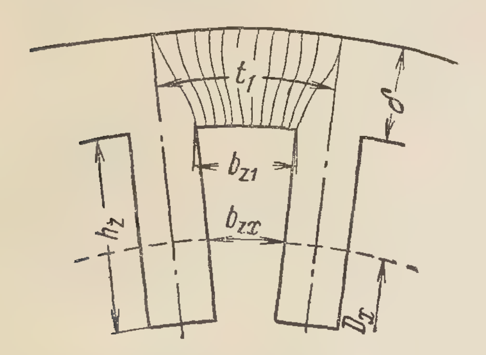


Рис. 6-9. Распределение магнитных линий при зубчатом якоре.

Коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера). Приведенные значения α_δ для различных видов машин не учитывали наличия пазов; они относились к гладкому якорю. При зубчатом якоре мы считаем, что магнитная проводимость воздушного зазора распределяется неравномерно: над зубцом она больше, чем над пазом. Индукционные линии стягиваются к коронке зубца, как показано на рис. 6-9, и индукция у коронки зубца получается большей, чем при гладком якоре. Следовательно, при том же потоке Ф магнитное напряжение воздушного зазора при зубчатом якоре будет больше, чем при гладком. Это увеличение магнитного напряжения при зубчатом якоре учитывается обычно не посредством уменьшения расчетной полюсной дуги b_δ, а посредством замены зубчатой поверхности якоря гладкой и введения вместо действительного расчетного воздушного зазора

$$\delta' = k_\delta \delta, \qquad (6\text{-}15)$$

где $k_\delta > 1$.

Коэффициент k_δ называется коэффициентом воздушного зазора (или коэффициентом Картера). Его значение можно рассчитать по эмпирической формуле

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta}, \qquad (6\text{-}16)$$

где t_1 — зубцовое деление по окружности якоря;
b_{z1} — ширина коронки зубца (рис. 6-9).

Более точное значение для k_δ получается по формуле

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma\delta}; \qquad (6\text{-}17)$$

здесь

$$\gamma = \frac{\left(\dfrac{b_{\text{ш}1(2)}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\dfrac{b_{\text{ш}1(2)}}{\delta}\right)}, \qquad (6\text{-}18)$$

где $b_{\text{ш}1(2)}$ — ширина открытия (щели, шлица) паза статора или ротора, при открытых пазах равная ширине паза $b_\text{п}$.

Значения k_δ можно также найти по кривым, приведенным на рис. 6-10, или номограмме, приведенной на рис. 6-11.

Если пазы имеются на роторе и статоре (машины постоянного тока с компенсационной обмоткой, асинхронные машины, синхронные машины с успокоительной обмоткой), то коэффициент воздушного зазора с достаточным приближением можно считать равным:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \qquad (6\text{-}19)$$

Значения

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} \text{ и } k_{\delta_2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta}$$

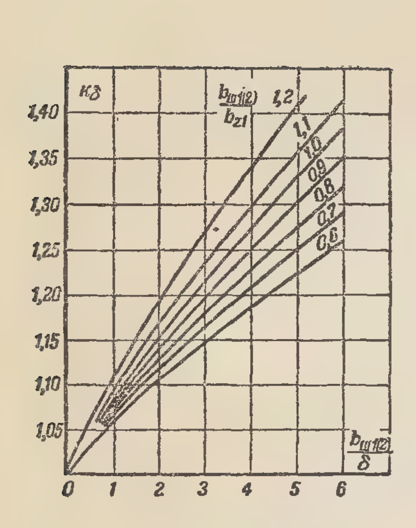
находят по (6-17) и (6-18), считая попеременно одну из обеих частей машины, как не имеющую пазов.

Таким образом, *магнитное напряжение воздушного зазора*

$$F_\delta = 1{,}6 B_\delta k_\delta \delta, \ a, \qquad (6\text{-}20)$$

где B_δ — в гаусах, δ — в сантиметрах.

* Методы определения $\alpha_{\delta i}$, k_B и других величин, необходимых для расчета магнитной цепи неявнополюсных синхронных машин, изложены в гл. 14.



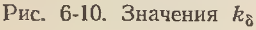


Рис. 6-10. Значения k_δ

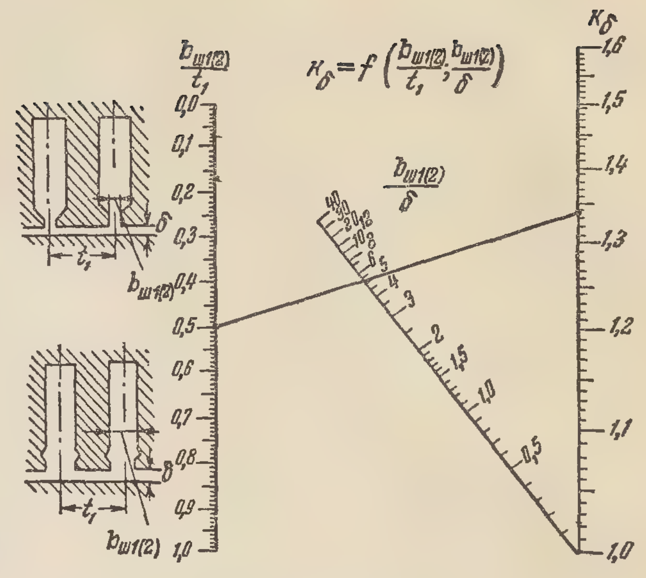


Рис. 6-11. Номограмма для определения k_δ.

(Пример: $t_1=20$ *мм*; $b_{ш1}=10$ *мм*; $\delta=2$ *мм*; $b_{ш1}/t_1=0{,}5$; $b_{ш1}/\delta=5$; $k_\delta=1{,}34$.)

6-2. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЗУБЦОВ

Магнитное напряжение зубцов равно:

$$F_z = 2h_z H_z, \qquad (6\text{-}21)$$

где h_z — высота зубца в радиальном направлении;

H_z — расчетная напряженность поля, значение которой определяется указанными ниже способами.

На зубцовое деление приходится поток

$$\Phi_t = B_\delta l_\delta t_1. \qquad (6\text{-}22)$$

По отношению к этому потоку зубец и паз включены параллельно. Так как магнитная проводимость стали во много раз больше, чем воздуха, то бо́льшая часть потока Φ_t проходит через зубец.

Если b_{zx} обозначает ширину зубца, соответствующую диаметру D_x (см. рис. 6-9), то активное сечение зубца

$$S_{zx} = k_c l b_{zx}, \qquad (6\text{-}23)$$

где k_c — коэффициент заполнения пакета сталью (см. табл. 2-4);

l — длина якоря без вентиляционных каналов (см. рис. 6-3).

Для машин с пазами, имеющими параллельные стенки (ширина паза $b_п$ постоянна), ширина зубца изменяется вместе с диаметром окружности D_x.

Если на окружности якоря расположено Z пазов, то

$$t_{пx} = \frac{\pi D_x}{Z} \text{ и } b_{zx} = t_{пx} - b_п$$

(при определении размеров зубца следует брать размеры паза «в штампе»).

Расчетная индукция в зубце

$$B'_{zx} = \frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{B_\delta l_\delta t_1}{k_c l b_{zx}}. \qquad (6\text{-}24)$$

При $B'_{zx} \leqslant 18\,000$ *гс* можно считать, что поток Φ_t проходит только через зубец. В этом случае действительная индукция в зубце B_{zx} принимается равной B'_{zx}.

При $B'_{zx} > 18\,000$ *гс* следует учитывать, что через зубец проходит только часть потока Φ_t и действительная индукция в зубце B_{zx} будет меньше, чем B'_{zx}.

Поток Φ_t распадается на два потока: поток Φ_{zx}, проходящий через зубец, и поток $\Phi_{пx}$, проходящий через паз. Следовательно,

$$\Phi_t = \Phi_{zx} + \Phi_{пx}. \qquad (6\text{-}25)$$

Разделив (6-25) на S_{zx} и умножив второй член правой части равенства на $S_п/S_п (S_п \approx b_п l_\delta)$, получим:

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{пx}}{S_{zx}} \cdot \frac{S_п}{S_п}, \qquad (6\text{-}26)$$

что дает соответственно:

$$B'_{zx} = B_{zx} + B_{пx} \frac{S_п}{S_{zx}} = B_{zx} + $$

$$+ \mu_0 H_{пx} \frac{S_п}{S_{zx}} 10^8, гс, \qquad (6\text{-}27)$$

где $B_{пx} = \mu_0 H_{пx} \cdot 10^8$ — индукция в пазу, *гс*; $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8} = 1{,}256 \cdot 10^{-8}$ *гн/см* — магнитная проницаемость для пространства паза.

Приближенно полагая, что линия уровня для магнитного поля есть окружность с диаметром D_x, можем принять $H_{пx} = H_{zx}$.

Уравнение (6-27) теперь можно переписать в следующем виде:

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} k_{пx} \cdot 10^8 =$$

$$= B_{zx} + 1{,}256\, k_{пx} H_{zx}, \qquad (6\text{-}28)$$

где H_{zx} — напряженность поля для соответствующего сечения зубца;

$k_{пx}$ — коэффициент, который рассчитывается по формуле

$$k_{пx} = \frac{S_п}{S_{zx}} = \frac{b_п l_\delta}{k_c l b_{zx}}. \qquad (6\text{-}29)$$

При практических расчетах обычно пользуются кривыми, выражающими зависимость B'_{zx} от H_{zx} при различных значениях $k_{пx}$*. Построение таких кривых согласно (6-28) производится следующим образом: к ординатам кривой намагничивания $B_{zx} = f(H_{zx})$ для той стали, из которой выполняется якорь машины, прибавляется $1{,}256\, k_{пx} H_{zx}$ при данном значении $k_{пx}$ (H_{zx} соответствует выбранной ординате) и то же самое делается при других значениях $k_{пx}$. Следовательно, рассчитав по (6-24) B'_{zx} и по (6-29) $k_{пx}$, по указанным кривым найдем соответствующие значения H_{zx} и B_{zx}.

Так как сечение зубца по его высоте изменяется (при открытых пазах), то B_{zx}, а следовательно, и H_{zx} для различных сечений зубца также различны. В этом случае можно найти H_{zx} для нескольких сечений зубца и магнитное напряжение зубцов определить при помощи суммирования:

$$F_z = 2 \sum_{1}^{n} H_{zx} \Delta h_z. \qquad (6\text{-}30)$$

Очевидно, что чем больше будет взято число n сечений зубца по высоте, тем точнее получится результат.

В расчетной практике ограничиваются определением B_{zx} только в трех сечениях зубца: наибольшем, наименьшем и среднем. Для этих сечений определяются, как указывалось, $B_{z\,мин}$, $B_{z\,макс}$ и $B_{z\,ср}$ и соответствующие им $H_{z\,мин}$, $H_{z\,макс}$ и $H_{z\,ср}$ (рис. 6-12).

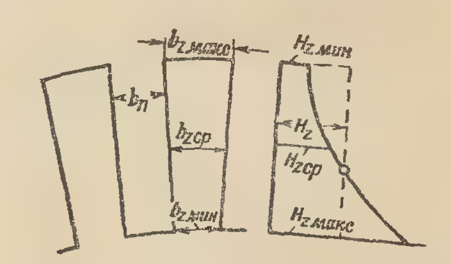


Рис. 6-12. К определению магнитного напряжения зубцов.

Расчетная напряженность поля рассчитывается по формуле приближенной квадратуры:

$$H_z = \frac{1}{6} (H_{z\,мин} +$$

$$+ H_{z\,макс} + 4H_{z\,ср}). \qquad (6\text{-}31)$$

Для прямоугольных открытых пазов с параллельными стенками при $B'_{z\,макс} \leqslant 21\,000$ *гс* достаточно при практических расчетах найти напряженность поля на $^1/_3$ высоты

* Кривые $B = f(H)$ для различных марок стали приведены в приложении II на рис. II-1 — II-5 при различных значениях $k_{пx}$.

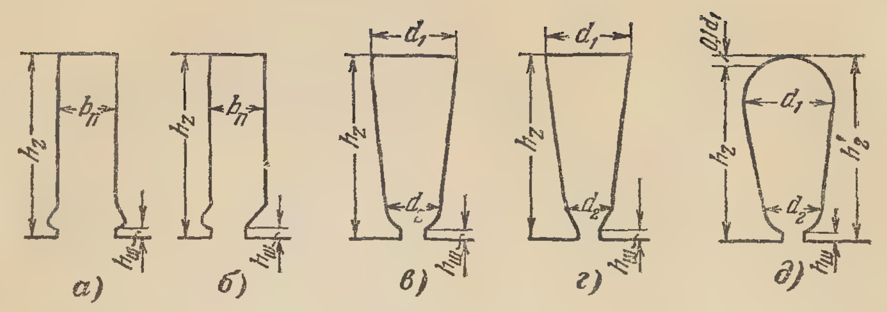


Рис. 6-13. Пазы статора (к определению магнитного напряжения зубцов статора).

зубца, считая от его наиболее узкого сечения, и принять

$$H_z = H_{z \cdot \frac{1}{3}}.$$

Для машин, имеющих пазы на статоре и роторе, необходимо найти магнитные напряжения F_{z1} и F_{z2} зубцов статора и ротора.

Размеры, по которым определяются расчетные значения h_z и H_z для подстановки их в формулу (6-21), зависят от формы пазов. На рис. 6-13 показаны пазы статора асинхронной и синхронной машин.

При пазах с параллельными стенками (рис. 6-13, *а* и *б*) h_z принимается равной действительной высоте зубца. Ширины зубца для определения сечений — минимального, максимального, среднего и на $^1/_3$ высоты зубца — определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} b_{z\text{мин}} &= \frac{\pi D}{Z_1} - b_\text{п};\ b_{z\text{макс}} = \\ &= \frac{\pi (D + 2h_z)}{Z_1} - b_\text{п}; \\ b_{z\text{ср}} &= \frac{b_{z\text{мин}} + b_{z\text{макс}}}{2}; \\ b_{z \cdot \frac{1}{3}} &= \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3} h_z\right)}{Z_1} - b_\text{п}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}32)$$

При трапецеидальных пазах (рис. 6-13, *в* и *г*) h_z также принимается равной действительной высоте зубца, а ширины зубца определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi (D + d_2 + 2h_\text{ш})}{Z_1} - d_2; \\ b''_z &= \frac{\pi (D + 2h_z)}{Z_1} - d_1; \\ b_{z\text{ср}} &= \frac{b'_z + b''_z}{2}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}33)$$

При грушевидных пазах (рис. 6-13, *д*)

$$\left.\begin{aligned} h_z &= h'_z - 0{,}1\, d_1; \\ b'_z &= \frac{\pi (D + d_2 + 2h_\text{ш})}{Z_1} - d_2; \\ b''_z &= \frac{\pi \left(D + 2h'_z - d_1\right)}{Z_1} - d_1; \\ b_{z\text{ср}} &= \frac{b'_z + b''_z}{2}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}34)$$

При трапецеидальных и грушевидных пазах достаточно определить индукцию в среднем сечении зубца и для нее найти H_z, так как $B_{z\text{макс}}$ в этом случае обычно не превышает 18 000 *гс*.

На рис. 6-14 показаны пазы ротора асинхронной машины; из них пазы по рис. 6-14, *а* и *в* применяются также для якоря машины постоянного тока.

Для пазов по рис. 6-14, *а* и *б* h_z принимается равной действительной высоте зубца, а для паза по рис. 6-14, *в* $h_z = h'_z - 0{,}1\ d_2$; ширина зубца определяется аналогично предыдущему:

для пазов с параллельными стенками

$$b_{z \cdot \frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D' - \frac{4}{3} h_z\right)}{Z_2} - b_\text{п}; \quad (6\text{-}35)$$

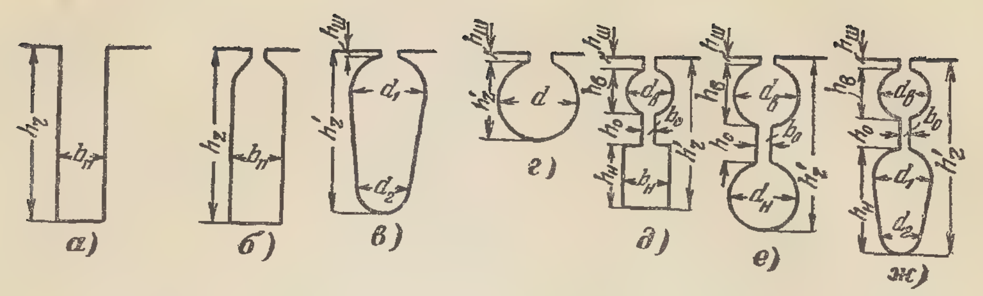


Рис. 6-14. Пазы ротора (к определению магнитного напряжения зубцов ротора).

для грушевидных пазов (при $d_1 = d_2$ паз превращается в овальный)

$$\left.\begin{aligned} b'_z &= \frac{\pi (D' - d_1 - 2h_z)}{Z_2} - d_1; \\ b''_z &= \frac{\pi (D' - 2h_z + d_2)}{Z_2} - d_2; \\ b_{z\text{ср}} &= \frac{b'_z + b''_z}{2} \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}36)$$

(D' и Z_2 — внешний диаметр и число пазов ротора);

для круглых пазов (рис. 6-14, *г*)

$$h_z = h'_z - 0{,}1\,d;\; b_{z\cdot\frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D' - \frac{2}{3}\,d - 2h_\text{ш}\right)}{Z_2} - 0{,}94\,d. \quad (6\text{-}37)$$

При двойной клетке на роторе рассчитываются частичные магнитные напряжения верхней ($F_{z\text{в}}$) и нижней ($F_{z\text{н}}$) частей зубцов. Их сумма принимается равной полному магнитному напряжению зубцов ротора:

$$F_z = F_{z\text{в}} + F_{z\text{н}}.$$

Если верхняя клетка закладывается в круглые пазы (рис. 6-14, *д*, *е* и *ж*), то магнитное напряжение соответствующей части зубцов рассчитывается так же, как и для круглого паза.

При прямоугольных пазах для нижней клетки (рис. 6-14, *д*)

$$h_z = h_\text{н};\; b_{z\cdot\frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D' - 2h'_z + \frac{2}{3}\,h_\text{н}\right)}{Z_2} - b_\text{п}; \quad (6\text{-}38)$$

при круглых пазах для нижней клетки (рис. 6-14, *е*)

$$h_z = d_\text{н} - 0{,}1\,d_\text{н};\; b_{z\cdot\frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D' - 2h'_z + \frac{4}{3}\,d_\text{н}\right)}{Z_2} - 0{,}94\,d_\text{н}; \quad (6\text{-}39)$$

при пазах для нижней клетки по рис. 6-14, *ж*

$$h_z \approx h_\text{н} - 0{,}1\,(d_1 + d_2);$$

$$b'_z = \frac{\pi\,[D' - 2\,(h_\text{ш} + d_\text{в} + b_0) - d_1]}{Z_2} - d_1;$$

$$b''_z = \frac{\pi\,(D' - 2h_z + d_2)}{Z_2} - d_2;$$

$$b_{z\text{ср}} = \frac{b'_z + b''_z}{2}. \quad (6\text{-}40)$$

6-3. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ

Поток Φ_m в сердечнике полюса больше потока Φ в воздушном зазоре на величину потока рассеяния полюсов Φ_σ:

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \sigma\Phi, \quad (6\text{-}41)$$

где σ — коэффициент рассеяния полюсов *.

Так как поток по высоте полюса изменяется незначительно, то можно расчетную индукцию в полюсе принять равной:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \frac{\sigma\Phi}{S_m}, \quad (6\text{-}42)$$

* Способы расчета Φ_σ и σ, а также магнитного напряжения полюсов при больших значениях B_m (>16 000 *гс*) указываются в дальнейшем (см. § 6-6).

где S_m — активное сечение полюсного сердечника.

Если b_m обозначает ширину полюсного сердечника; l_m — его длину по оси, то активное сечение полюса

$$S_m = k_c b_m l_m. \qquad (6\text{-}43)$$

Коэффициент заполнения сталью k_c при полюсах, собранных из листов, можно принять равным 0,95—0,97 (см. табл. 2-4).

Определив для B_m по кривой (или таблице) намагничивания напряженность H_m, находят магнитное напряжение полюсов (на пару полюсов):

$$F_m = 2L_m H_m, \qquad (6\text{-}44)$$

где L_m — высота полюса (рис. 6-15).

6-4. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЯРМА СТАТОРА

Примем поток в ярме статора равным $\sigma\Phi/2$. При расположении полюсов на роторе следует взять $\sigma=1$ (рис. 6-15, *а*); при расположении полюсов на статоре (рис. 6-15, *б*) значение σ принимается таким же, как и для полюсов. В расчет вводится среднее значение индукции в среднем сечении ярма статора, т. е.

$$B_c = \frac{\sigma\Phi}{2S_c}, \qquad (6\text{-}45)$$

где S_c — активное сечение ярма статора.

При обычной конструкции явнополюсной синхронной машины (при расположении полюсов на роторе), а также для асинхронных машин

$$S_c = h_c l k_c, \qquad (6\text{-}46)$$

где h_c — высота ярма статора.

Высота ярма статора определяется по следующей формуле (рис. 6-16):

$$h_c = \frac{D_a - D}{2} - h_{z1} - \frac{2}{3} m_{a1} d_{a1}, \qquad (6\text{-}47)$$

где D_a и D — внешний и внутренний диаметры статора;

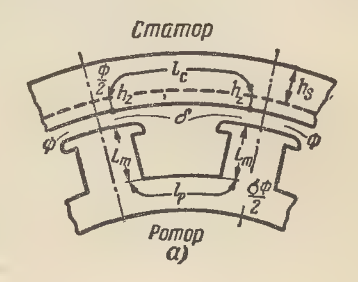
h_{z1} — высота зубцового слоя статора;

m_{a1} — число рядов осевых вентиляционных каналов по высоте ярма (обычно $m_{a1}=1$);

d_{a1} — диаметр круглого канала.

При отсутствии осевых каналов $\frac{2}{3} m_{a1} d_{a1} = 0$.

Сечение S_c для машины, имеющей полюсы на статоре, определяется по геометрическим размерам ярма статора.



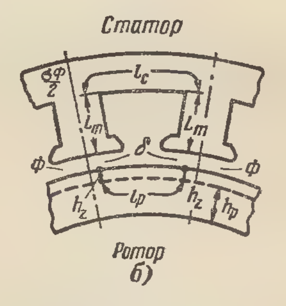


Рис. 6-15. Магнитные цепи явнополюсных машин.

Найдя для B_c по кривой (или таблице) намагничивания напряженность поля H_c, определяют магнитное напряжение ярма статора (на два полюса):

$$F_c = \zeta H_c l_c. \qquad (6\text{-}48)$$

Средняя длина индукционных линий в ярме l_c определяется по рис. 6-16 или приближенно по формуле

$$l_c = \frac{\pi (D_a - h_c)}{2p}. \qquad (6\text{-}49)$$

Коэффициент ζ учитывает, что индукция вдоль линии l_c не остается постоянной: она имеет наибольшее значение в сечении ярма, соот-

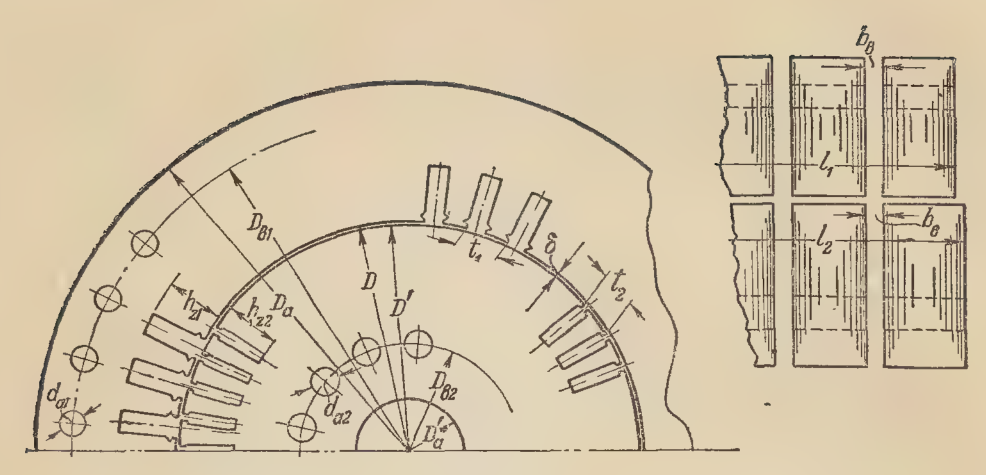


Рис. 6-16. Размеры активной стали асинхронной машины.

ветствующем $0{,}5\,l_c$, и уменьшается в обоих направлениях от этого сечения. При расположении полюсов на статоре принимается $\zeta=1$. При расположении полюсов на роторе ζ заметно отличается от единицы. В этом случае рекомендуется брать ζ из кривой, приведенной на рис. 6-17

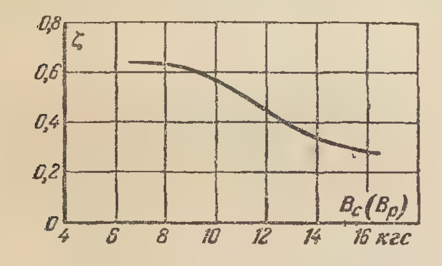


Рис. 6-17. К определению магнитного напряжения ярма статора или ротора.

(кривую можно считать приближенно пригодной для всех марок стали).

При расчете магнитного напряжения ярма статора асинхронной машины, который производится по (6-48), поток в ярме статора принимается равным $\Phi/2$, т. е. половине потока в воздушном зазоре. Значение ζ при этом также рекомендуется брать по рис. 6-17.

Для статоров синхронных и асинхронных машин при $B_c > 14\,000$ *гс* (для сталей Э1, Э2 и приближенно Э3 и Э4) напряженность поля H_c можно брать из кривой (или таблицы) намагничивания для индукции, равной $(B_c - 4\,000)$ *гс*, где B_c — по (6-45).

6-5. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЯРМА РОТОРА

В общем случае поток в ярме ротора равен $\sigma\Phi/2$, причем при расположении полюсов на статоре (см. рис. 6-15, *б*) следует принять $\sigma=1$. Среднее значение индукции в среднем (по длине $l_р$) сечении ярма ротора

$$B_р = \frac{\sigma\Phi}{2S_р}, \qquad (6\text{-}50)$$

где $S_р$ — активное сечение ярма ротора.

Для обычной синхронной машины $S_р$ определяется по размерам ярма. Для машин постоянного тока и асинхронных имеем:

$$S_р = h_р l k_c, \qquad (6\text{-}51)$$

где $h_р$ — высота ярма ротора; она рассчитывается по формуле (см. рис. 6-16)

$$h_р = \frac{D' - D'_a}{2} - h_{z2} - \frac{2}{3} m_{a2} d_{a2}, \qquad (6\text{-}52)$$

где D' и D'_a — внешний и внутренний диаметры ротора;

h_{z2} — высота зубцового слоя ротора;

m_{a2} — число рядов осевых вентиляционных каналов по высоте ярма (обычно $m_{a2}=1$);

d_{a2} — диаметр канала.

При отсутствии каналов нужно принять $\frac{2}{3}m_{a2}d_{a2}=0$.

Найдя для $B_р$ напряженность поля $H_р$, определим магнитное напряжение ярма ротора (на два полюса):

$$F_р=\zeta H_р l_р. \qquad (6\text{-}53)$$

При расположении полюсов на роторе и для машин постоянного тока $\zeta\approx 1$; для асинхронных машин при $2p>2$ следует ζ брать по рис. 6-17.

Средняя длина индукционных линий $l_р$ определяется по чертежу (см. рис. 6-15) или для асинхронных машин при $2p>2$ и машин постоянного тока по формуле

$$l_р=\frac{\pi\left(D'_a+h_р\right)}{2p}, \qquad (6\text{-}54)$$

где $h_р$ рассчитывается по (6-52).

Для асинхронных машин с посадкой пакетов ротора непосредственно на вал высоту ярма ротора следует рассчитывать по формуле

$$h_р=\frac{D'-D'_a+\frac{1}{6}D'_a}{2}-h_{z2}-\frac{2}{3}m_{a2}d_{a2}. \qquad (6\text{-}55)$$

Здесь учитывается, что часть магнитного потока проходит и по валу, так как при малой частоте перемагничивания ($f_2=sf_1$ при $s\approx\approx 0{,}01\div 0{,}05$) глубиной проникновения поля в массивный вал не следует пренебрегать.

Для асинхронных машин при $2p=2$ расчет магнитного напряжения $F_р$ производится следующим образом.

Сначала определяется индукция в части ярма ротора, не имеющей аксиальных вентиляционных отверстий:

$$B'_р=\frac{\Phi}{2S'_р}, \qquad (6\text{-}56)$$

где $S'_р=h'_р lk_c$ при

$$h'_р=\frac{D'}{2}-h_{z2}-m_{a2}d_{a2}; \qquad (6\text{-}57)$$

длина пути потока в этой части ярма ротора

$$l'_р=2h'_р; \qquad (6\text{-}58)$$

соответствующее магнитное напряжение

$$F'_р=H'_р l'_р, \qquad (6\text{-}59)$$

где $H'_р$ должно быть взято для $B'_р$.

Затем определяется индукция в части ярма ротора с аксиальными вентиляционными отверстиями:

$$B''_р=\frac{\Phi''}{2S''_р}, \qquad (6\text{-}60)$$

где

$$\Phi''=\Phi\frac{D_{в2}-d_{a2}}{2h'_р};$$

$$S''_р=0{,}5\left(\frac{\pi}{2}D_{в2}-\frac{n_{a2}}{2}d_{a2}\right)lk_c \qquad (6\text{-}61)$$

(n_{a2} — число отверстий в одном ряду); длина пути потока в этой части ярма ротора

$$l''_р=2d_{a2}; \qquad (6\text{-}62)$$

соответствующее магнитное напряжение*

$$F''_р=H''_р l''_р, \qquad (6\text{-}63)$$

где $H''_р$ берется для $B''_р$.

Отсюда находится полное магнитное напряжение ярма ротора при $2p=2$:

$$F_р=F'_р+F''_р. \qquad (6\text{-}64)$$

При отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в (6-57) принимается $m_{a2}d_{a2}=0$ и $F_р=F'_р$.

6-6. КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ ПОЛЮСОВ

Коэффициент рассеяния полюсов

$$\sigma=\frac{\Phi+\Phi_\sigma}{\Phi}=1+\frac{\Phi_\sigma}{\Phi}. \qquad (6\text{-}65)$$

* При наличии нескольких рядов отверстий расчеты должны быть произведены по (6-60) — (6-63) для каждого ряда при соответствующем диаметре $D_{в2}$.

Для машин нормальной конструкции, имеющих полюсы на статоре, $\sigma = 1{,}1 \div 1{,}2$; для машин с полюсами на роторе $\sigma = 1{,}1 \div 1{,}25$. Более точное определение Φ_σ, а следовательно, и σ может быть произведено на основе построения индукционных трубок поля рассеяния и определения их проводимости. К этому способу приходится обращаться при проектировании специальных машин, если необходимо возможно точнее определить σ.

При практических расчетах для нормальных машин с полюсами на статоре Φ_σ можно определить по формуле

$$\Phi_\sigma \approx \frac{k l_m b_m}{\tau} \left(F_\delta + F_z + F_p\right), \quad (6\text{-}66)$$

где F_δ, F_z, E_p — магнитные напряжения, найденные для потока Φ; $k \approx 4{,}5$ для машин постоянного тока с добавочными полюсами; $k \approx 4$ для тех же машин без добавочных полюсов.

Для машин, имеющих полюсы на роторе, Φ_σ можно определить по следующей формуле:

$$\Phi_\sigma = 2\left(F_\delta + F_z + F_c\right)\left(\Lambda_p + \Lambda_m\right), \quad (6\text{-}67)$$

где Λ_p — проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных наконечников (рис. 6-18):

$$\Lambda_p = \frac{l_p h_{pm}}{0{,}8 a_p} + 2 h_{pm} \lg\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{b_p}{a_p}\right), \quad (6\text{-}68)$$

при

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3}; \quad (6\text{-}69)$$

Λ_m — эквивалентная проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных сердечников (рис. 6-18):

$$\Lambda_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_m b_m}{0{,}8 a_m} + h_m \lg\left(1 - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{a_m}\right). \quad (6\text{-}70)$$

При круглых полюсах для расчета проводимостей заменяют круглое сечение равновеликим квадратом.

В машинах с малым числом полюсов их поверхности имеют одна относительно другой большой наклон. В этом случае проводимости Λ_p и Λ_m лучше всего определять при помощи трубок поля, при вычерчивании которых большой точности не требуется.

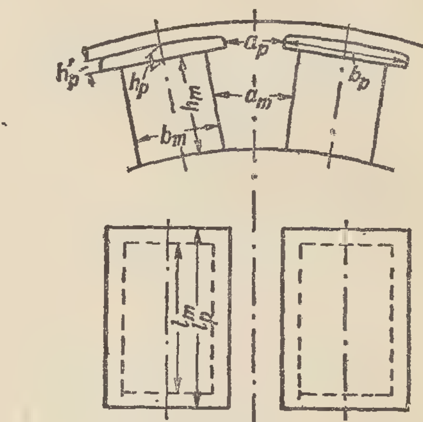


Рис. 6-18. К определению проводимостей потоков рассеяния полюсов синхронной машины.

В § 6-3 были приведены формулы для расчета магнитного напряжения полюсов F_m, которые дают достаточно точные результаты, если индукция B_m в основании полюса не превышает 16 000 *гс*. Если $B_m > 16\,000$ *гс*, то при определении F_m следует учесть изменение потока по высоте полюса. При этом рассчитываются потоки в трех сечениях полюса:

в его основании $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$;

у полюсного наконечника $\Phi'_m = \Phi + \frac{\Lambda_p}{\Lambda_p + \Lambda_m}\Phi_\sigma$;

в среднем сечении $\Phi_{m\,ср} \approx 0{,}5(\Phi_m + \Phi'_m)$.

Разделив указанные потоки на сечение полюса S_m, найдем индукции B_m, B'_m, $B_{m\,ср}$ $[B_{m\,ср} \approx 0{,}5(B_m + B'_m)]$ и затем по таблице намагничивания — соответственно напряженности поля H_m, H'_m, $H_{m\,ср}$. Расчетная напряженность поля, которую нужно подставить в (6-44) вместо H_m, с некоторым приближением определяется по формуле

$$H_{mp} = \frac{1}{6}\left(H_m + H'_m + 4H_{m\,ср}\right). \quad (6\text{-}70а)$$

6-7. НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ СИЛЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Здесь рассматриваются способы определения н. с. $F_{цепи}$ применительно к отдельным видам машин.

Суммирование магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи дает магнитное напряжение полного обхода или н. с. возбуждения $F_{цепи}$ на два полюса; например, для явнополюсной машины

$$F_{цепи} = \Sigma F = 2I_{в} w_{в}, \qquad (6\text{-}71)$$

где $I_{в}$ — ток возбуждения;

$w_{в}$ — число витков обмотки возбуждения на один полюс.

Расчет н. с. $F_{цепи}$ производится для определенного потока. Если произвести расчет $F_{цепи}$ для различных значений потока Φ и нанести этот поток как функцию $F_{цепи}$, то получится магнитная характеристика $\Phi = f(F_{цепи})$.

Так как э. д. с. машины при постоянной скорости вращения пропорциональна потоку Φ, а $F_{цепи}$ пропорциональна току возбуждения $I_{в}$, то кривая $\Phi = f(F_{цепи})$ при других масштабах дает также характеристику хода $E = f(I_{в})$.

1. Машина постоянного тока. Электродвижущая сила якоря определяется следующим соотношением:

$$E = \frac{pn}{60}\frac{N}{a}\Phi \cdot 10^{-8}\, в, \qquad (6\text{-}72)$$

где N — общее число проводников;

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Из (6-72) получаем:

$$\Phi = \frac{E \cdot 10^{8}}{\frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a}}, \ мкс. \qquad (6\text{-}73)$$

Для этого значения потока Φ определяются магнитные напряжения воздушного зазора, зубцов и ярма якоря F_{δ}, F_{z} и $F_{р}$. Найдя сумму этих напряжений, по (6-66) определяют поток Φ_{σ}, а затем поток $\Phi_{m} = \Phi + \Phi_{\sigma}$ в полюсе и поток $\Phi_{m}/2$ в ярме статора.

Как отмечалось, приближенно принимается, что поток по высоте полюса не изменяется, вследствие чего соответствующие магнитные напряжения получаются с некоторым преувеличением. Но так как магнитные напряжения полюсов и ярма статора составляют небольшую долю общего магнитного напряжения, то допускаемая при их определении неточность в обычных случаях (при $B_{m} \leqslant 16\,000$ *гс*) не имеет практического значения.

По потокам Φ_{m} и $\Phi_{m}/2$ определяются F_{m} и $F_{с}$.

Следует также учесть неизбежный зазор $\delta_{с}$ в стыке сердечника полюса и ярма статора (станины). Магнитное напряжение этого зазора

$$F_{\delta m} = 1{,}6 B_{m} \delta_{с}, \qquad (6\text{-}74)$$

где $\delta_{с} \approx 0{,}01 \div 0{,}02$ *см* (тем больше, чем больше длина машины и внутренний диаметр расточки станины).

При наличии компенсационной обмотки необходимо также найти магнитное напряжение F_{zk} зубцового слоя полюсов.

Следовательно,

$$F_{цепи} = F_{\delta} + F_{z} + F_{р} + F_{m} + F_{с} + F_{\delta m} + F_{zk} = 2I_{в} w_{в}. \qquad (6\text{-}75)$$

2. Асинхронная машина. В обычных случаях для такой машины нет необходимости рассчитывать всю характеристику холостого хода, а достаточно определить только одну ее точку, а именно точку, соответствующую холостому ходу при номинальном напряжении.

Электродвижущая сила, наведенная в обмотке статора,

$$E_{1} = 4k_{B} f_{1} w_{1} k_{о1} \Phi \cdot 10^{-8}, \ в. \qquad (6\text{-}76)$$

Значения коэффициента формы кривой поля k_{B} в зависимости от k_{z} приведены на рис. 6-4. Для асинхронных машин нормального исполнения коэффициент насыщения зубцов k_{z} колеблется между 1,15 и 1,5 и может быть принят в первом приближении равным 1,325, чему соответствует $\alpha_{\delta} = 0{,}715$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{о1} = k_{у1} k_{р1}, \qquad (6\text{-}77)$$

где коэффициент укорочения для шага обмотки $y = \beta\tau$

$$k_{у1} = \sin\frac{y}{\tau}\cdot\frac{\pi}{2} = \sin\beta\frac{\pi}{2} \qquad (6\text{-}78)$$

и коэффициент распределения при целом числе пазов на полюс и фазу q и числе фаз m

$$k_{p1}=\frac{\sin\frac{\pi}{2m}}{q\sin\frac{\pi}{2qm}}. \qquad (6\text{-}79)$$

Для двухслойных обмоток при q, равном дробному числу, коэффициент укорочения k_{y1}, так же как и при q, равном целому числу, определяется по (6-78). Коэффициент распределения для таких обмоток при $m=3$ может быть найден по формуле

$$k_{p1}=\frac{\sin 30^\circ}{N\sin\frac{30^\circ}{N}}; \qquad (6\text{-}80)$$

здесь N определяется из равенства $q=N/d$, где N/d — несократимая дробь.

Значения обмоточных коэффициентов трехфазных обмоток для первой гармоники э. д. с. (и н. с.) могут быть взяты из таблиц и кривых приложения VIII.

Для асинхронных двигателей можно принять, что э. д. с. E_1 при холостом ходе меньше напряжения на зажимах U_1 на величину падения напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния первичной обмотки $I_\mu x_1$, где I_μ — намагничивающий ток (приблизительно равен току холостого хода). Следовательно,

$$E_1=U_1-I_\mu x_1=\left(1-\frac{I_\mu x_1}{U_1}\right)U_1=$$
$$=k_E U_1, \qquad (6\text{-}81)$$

где приближенно

$$k_E=1-27\frac{\delta}{\tau q_1 k_{o1}^2}. \qquad (6\text{-}81a)$$

Для нормальных машин при $P_н \geqslant 10$ *квт* значения k_E в зависимости от числа пар полюсов можно также брать по кривой на рис. 6-19.

Из равенств (6-76) и (6-81) получаем:

$$\Phi=\frac{k_E U_1\cdot 10^8}{4k_B f_1 w_1 k_{o1}},\ мкс. \qquad (6\text{-}82)$$

В первом приближении можно принять $k_B=1{,}09$, чему соответствует $\alpha_\delta=0{,}715$ при $k_z=1{,}325$. Поток Φ по (6-82) есть поток в воздушном зазоре. Для этого потока следует определять магнитные напряжения воздушного зазора, зубцов и ярма ротора. В зубцах и ярме статора поток будет больше, чем Φ, на некоторую часть потока рассеяния, поэтому при расчете магнитных напря-

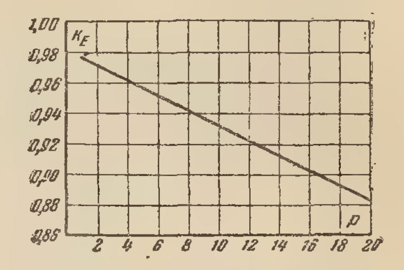


Рис. 6-19. Значения k_E в зависимости от числа пар полюсов для нормальных асинхронных двигателей.

жений этих участков магнитной цепи рекомендуется исходить для надежности из потока $\frac{3\Phi}{1+2k_E}$.

После того как найдены магнитные напряжения F_δ, F_{z1} и F_{z2}, определяется значение k_z:

$$k_z=\frac{F_\delta+F_{z1}+F_{z2}}{F_\delta}, \qquad (6\text{-}83)$$

и сравнивается со значением k_z, принятым в первом приближении при определении α_δ и k_B. Если значения эти различаются, то можно взять среднее значение и еще раз выполнить расчет и т. д. Вместо такого метода последовательных приближений рекомендуется воспользоваться поправочной (пунктирной) кривой на рис. 6-20; при этом для второго расчета значение α_δ следует взять по поправочной кривой для k_z, рассчитанного по (6-83) в первом приближении; этим вторым расчетом можно ограничиться, приняв $k_B=\text{const}$.

Намагничивающая сила магнитной цепи (на два полюса)

$$F_{цепи}=F_\delta+F_{z1}+F_{z2}+$$
$$+F_p+F_c. \qquad (6\text{-}84)$$

Для н. с. $F_{цепи}$ определяется намагничивающий ток I_μ по соотношению

$$I_\mu = \frac{pF_{цепи}}{0,9m_1 w_1 k_{o1}}. \qquad (6\text{-}85)$$

3. **Явнополюсная синхронная машина.** Магнитный поток рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{E_0 \cdot 10^8}{4k_B\, fwk_o}, \textit{ мкс}, \qquad (6\text{-}86)$$

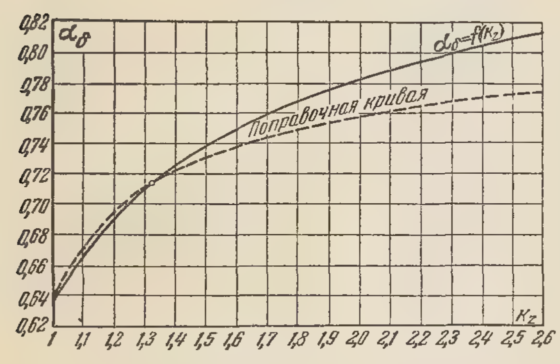


Рис. 6-20. К определению α_δ.

где E_0 — э. д. с., наведенная в обмотке якоря;

k_B — коэффициент формы кривой поля (берется по кривой на рис. 6-7 или 6-8);

k_o — обмоточный коэффициент для первой гармоники, определяемый так же, как для асинхронной машины.

Для потока Ф определяются магнитные напряжения воздушного зазора, зубцов и ярма якоря.

Для определения магнитных напряжений полюсов и их ярма нужно взять поток $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \sigma\Phi$.

Вначале определяется $F_\delta + F_z + F_c$, где F_c — магнитное напряжение ярма статора, если полюсы расположены на роторе; в противном случае вместо F_c нужно взять F_p. Затем по (6-67) или при расположении полюсов на статоре по (6-66) рассчитывается Φ_σ и для потока $\Phi + \Phi_\sigma$ магнитные напряжения F_m и F_p (или F_m и F_c). При наличии успокоительной обмотки необходимо найти магнитное напряжение зубцового слоя полюсов $F_{zд}$ по (6-21). Для больших синхронных машин необходимо также учитывать магнитное напряжение $F_{\delta m}$ зазоров в стыках полюсных сердечников с ярмом ротора (см. § 14-5).

Просуммировав все магнитные напряжения, найдем н. с. магнитной цепи:

$$F_\delta + F_z + F_c + F_{zд} + F_m + F_p + F_{\delta m} = F_{цепи} = 2I_в w_в. \qquad (6\text{-}87)$$

6-8. НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ СИЛЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ

Намагничивающую силу возбуждения при нагрузке приходится определять для машин постоянного тока и синхронных машин. Для асинхронных машин она обычно не определяется, так как здесь приближенно считают, что I_μ изменяется пропорционально э. д. с. (см. § 13-9).

1. **Машины постоянного тока.** Современные машины постоянного тока выполняются с добавочными полюсами и только малые машины на мощность, обычно меньшую 0,2—0,3 *квт*, выполняются без добавочных полюсов.

При наличии добавочных полюсов щетки, как известно, устанавливаются на геометрической нейтрали машины. В этом случае при нагрузке якорь будет создавать только поперечную н. с. Она будет искажать поле под главными полюсами и вместе с тем уменьшать полезный поток Ф, которым наводится э. д. с. якоря.

Пренебрегая действием н. с. якоря вне полюсной дуги, принимают, что поперечная н. с. якоря для соответствующего обхода равна $b_\delta A$, где A — линейная нагрузка, определяемая по формуле

$$A = \frac{I_a N}{2a\pi D}, \qquad (6\text{-}88)$$

где I_a — ток якоря;

N — число проводников его обмотки;

$2a$ — число параллельных ветвей его обмотки;

D — диаметр якоря.

Рассматриваемая н. с. действует по обходу, включающему воздушные зазоры, зубцы, пути по ярму якоря и поперек полюса. Можно

считать, что поперечная н. с. якоря изменяет лишь магнитные напряжения воздушных зазоров и зубцов. При этом используется «переходная» характеристика (рис. 6-21), представляющая собой зависимость

$$B_\delta = f[0{,}5(F_\delta + F_z)].$$

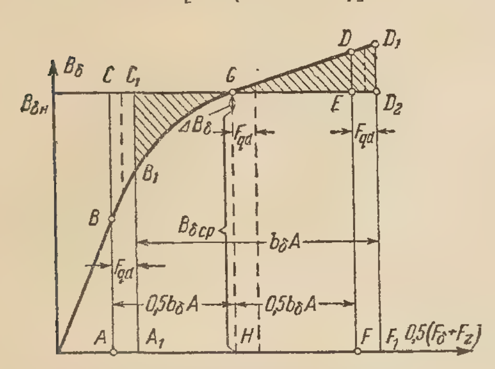


Рис. 6-21. Определение н. с. F_{qd}, обусловленной поперечной реакцией якоря.

Под каждой половиной полюса действует н. с. 0,5 $b_\delta A$. Отложим 0,5 $b_\delta A$ вправо и влево от н. с., соответствующей индукции $B_{\delta н} = \Phi_н / b_\delta l_\delta$ (рис. 6-21). Поток $\Phi_н$ определяется по э. д. с. якоря

$$E_{ан} = U_н \pm (I_{ан} \Sigma r + 2\Delta U_щ), \quad (6\text{-}89)$$

где $U_н$ — номинальное напряжение;

$I_{ан}$ — ток якоря при номинальной нагрузке;

Σr — сумма сопротивлений всех обмоток внутренней цепи якоря;

$2\Delta U_щ$ — падение напряжения в переходных контактах щеток; принимаются знак + для генератора и знак — для двигателя.

Как известно из общей теории машин постоянного тока, часть BGD переходной характеристики (рис. 6-21) соответствует форме кривой поля в воздушном зазоре по длине полюсной дуги при нагрузке машины.

Рисунок 6-21 показывает, что поток, который при холостом ходе можно принять пропорциональным площади прямоугольника $ACEF$, при нагрузке уменьшается, так как теперь он определяется площадью криволинейного четырехугольника $ABDF$: уменьшение потока на одной половине полюса больше, чем увеличение потока на другой половине полюса. Для того чтобы поток в воздушном зазоре остался неизменным и при нагрузке, необходимо н. с. обмотки возбуждения увеличить на некоторую величину F_{qd}, определяемую следующим образом.

Передвинем отрезок $\overline{AF} = b_\delta A$ вправо настолько, чтобы заштрихованные площади криволинейных треугольников были равны. При этом мы получим площадь криволинейного четырехугольника $A_1B_1D_1F_1$, равной площади прямоугольника $ACEF$. Найденная указанным способом F_{qd} и представляет собой ту н.с., которую должна добавочно создать обмотка возбуждения, чтобы компенсировать размагничивающее действие поперечной н.с. якоря.

Значение F_{qd} может быть найдено и без планиметрирования криволинейных треугольников по формуле

$$F_{qd} \approx \frac{1}{6} \cdot \frac{\overline{BC} - \overline{ED}}{\overline{BC} + \overline{ED}} b_\delta A. \quad (6\text{-}90)$$

Вывод (6-90) основан на следующем. Можно найти высоту прямоугольника с основанием $\overline{AF}$, равновеликого криволинейному четырехугольнику $ABDF$, воспользовавшись формулой приближенной квадратуры. Эта высота равна:

$$B_{\delta ср} \approx \frac{1}{6} (\overline{AB} + 4\overline{HG} + \overline{FD}). \quad (6\text{-}91)$$

Уменьшение индукции составляет:

$$\Delta B_\delta = B_{\delta н} - B_{\delta ср} =$$

$$= \overline{HG} - \frac{1}{6} (\overline{AB} + 4\overline{HG} + \overline{FD}) =$$

$$= \frac{1}{6} (\overline{BC} - \overline{ED}). \quad (6\text{-}92)$$

Отсюда находим уменьшение потока вследствие поперечной реакции якоря:

$$\Delta\Phi = \Delta B_\delta b_\delta l_\delta =$$

$$= \frac{1}{6} (\overline{BC} - \overline{ED}) b_\delta l_\delta. \quad (6\text{-}93)$$

При передвижении $\overline{AF}$ в положение $\overline{A_1F_1}$, чему соответствует увеличение н. с. обмотки возбуждения на F_{qd}, мы увеличиваем поток также на $\Delta\Phi$, причем это увеличение потока пропорционально сумме пло-

щадей небольших криволинейных четырехугольников BCC_1B_1 и EDD_1D_2, которая может быть заменена площадью прямоугольника с основанием b_δ A и высотой ΔB^δ.

Отсюда получаем, приближенно полагая, что сумма площадей BCC_1B_1 и EDD_1D_2 равна $(\overline{BC}+\overline{ED})F_{qd}$:

$$\Delta\Phi = \Delta B_\delta b_\delta l_\delta = = \frac{(\overline{BC}+\overline{ED})F_{qd}}{b_\delta A} b_\delta l_\delta. \qquad (6\text{-}94)$$

Из (6-94) и (6-93) находим (6-90).

Очевидно, что (6-90) дает несколько приуменьшенное значение для F_{qd}. Поэтому полученное значение надо рассматривать как первое приближение. Во втором приближении следует рассчитать F_{qd} по (6-90), но при этом в знаменатель подставить вместо $\overline{BC}$ и $\overline{ED}$ 0,5 $(\overline{BC}+\overline{B_1C_1})$ и 0,5 $(\overline{ED}+\overline{D_2D_1})$, чему соответствуют пунктирные отрезки на рис. 6-21.

В машинах постоянного тока (обычно в двигателях с широким диапазоном регулирования скорости вращения путем изменения тока возбуждения) при 0,5 b_δ $A>\overline{OH}$ (рис. 6-21) под одним из краев полюсного наконечника получается «опрокидывание» поля, т. е. изменение направления магнитных силовых линий. В этом случае при расчете F_{qd} можно также пользоваться формулой (6-90), причем для определения отрезка $\overline{BC}$, который теперь будет больше $\overline{HG}$, надо продолжить переходную характеристику в третьем квадранте и после расчета F_{qd} в первом приближении найти F_{qd}, как выше указано, во втором приближении.

При эксцентричном зазоре значение F_{qd} приближенно можно определить тем же методом по переходной характеристике $B_\delta = f[0{,}5(F_\delta + F_z)]$, где F_δ должна быть определена для расчетного зазора δ_p по (6-10а).

При отсутствии добавочных полюсов, если приходится для улучшения коммутации смещать щетки с геометрической нейтрали, необходимо учесть продольную н. с. реакции якоря, равную (на один полюс):

$$F_d = cA; \qquad (6\text{-}95)$$

здесь c — сдвиг щеток относительно геометрической нейтрали, *см*.

Для небольших машин нормального исполнения можно принять:

$$c \approx 0{,}4(\tau - b_\delta). \qquad (6\text{-}96)$$

Таким образом, н. с. обмотки возбуждения при нагрузке (на два полюса)

$$F_{\text{в.н}} = F_E + 2F_{qd} + 2F_d; \qquad (6\text{-}97)$$

здесь F_E — н. с., которой соответствует при холостом ходе э. д. с. $E_{\alpha\text{н}}$ (определяется по характеристике холостого хода).

При расчете обмотки возбуждения к полученной по (6-97) н. с. прибавляют для запаса величину $(0{,}10 \div 0{,}15)$ $F_{\text{в.н}}$, имея в виду неизбежную неточность расчета отдельных магнитных напряжений, обусловленную, например, не совсем точным совпадением использованной кривой $B=f(H)$ с действительной кривой $B=f(H)$ для примененной стали, возможными раковинами при отливке станины (ярма статора), не совсем точной центровкой якоря, отклонением действительного воздушного зазора от принятого при расчете.

В случае малых машин без добавочных полюсов с расположением щеток на геометрической нейтрали (например, реверсивные двигатели при $P \leqslant 500$ *вт*) приходится при определении $F_{\text{в.н}}$ учитывать также «коммутационную реакцию якоря», т. е. воздействие на поле машины добавочного тока коммутации.

2. **Синхронные машины.** Определение н. с. обмотки возбуждения $F_{\text{в.н}}$ явнополюсной машины при ее нагрузке, например при номинальных значениях напряжения $U_\text{н}$, тока $I_\text{н}$ и $\cos\varphi_\text{н}$, производится при помощи векторных диаграмм.

Рассмотрим диаграмму Блонделя (Blondel), при построении которой используется «метод двух реакций». Этот метод основан на разложении н. с. якоря на две составляющие: продольно действующую F_d и поперечно действующую F_q.

Обратимся сначала к ненасыщенной машине, для которой можно принять, что ее поля, созданные продольными н. с. якоря и обмотки возбуждения и поперечной н. с. якоря, существуют независимо одно от другого.

Амплитуда н. с. якоря (на два полюса)

$$F_a = 0{,}9m\frac{wk_0}{p} I. \qquad (6\text{-}98)$$

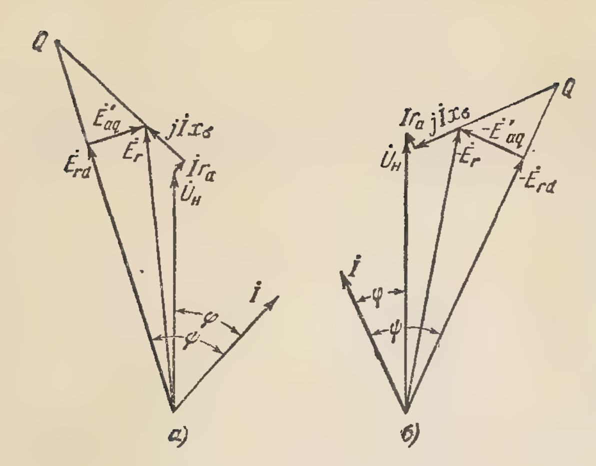


Рис. 6-22. Векторные диаграммы явнополюсной синхронной машины.

а — генератора; *б* — двигателя.

Продольно и поперечно действующие н. с. якоря

$$F_d = F_a \sin\psi; \qquad (6\text{-}99)$$

$$F_q = F_a \cos\psi, \qquad (6\text{-}100)$$

где ψ — угол сдвига между током якоря $\dot{I}$ и э. д. с. $\dot{E}_{rd}$ (или $-\dot{E}_{rd}$), наведенной результирующим продольным потоком (рис. 6-22)*.

При построении векторной диаграммы для определения э. д. с., наведенных полями реакции якоря, используется характеристика холостого хода — зависимость э. д. с. якоря E_0 от н. с. обмотки возбуждения $F_в$. Поэтому н. с. F_d и F_q обмотки якоря заменяются эквивалентными по своему действию н. с. F_{ad} и F_{aq} обмотки возбуждения.

F_{ad} и F_{aq} обмотки возбуждения будем считать эквивалентными по своему действию F_d и F_q обмотки якоря, если первые гармоники кривых полей, созданных F_{ad} и F_{aq}, будут такими же, как и первые гармоники кривых полей, созданных F_d и F_q. Для перехода от н. с. обмотки якоря к н. с. обмотки возбуждения вводятся коэффициенты k_{ad} и k_{aq}:

$$F_{ad} = k_{ad} F_d = k_{ad} F_a \sin\psi; \quad (6\text{-}101)$$

$$F_{aq} = k_{aq} F_q = k_{aq} F_a \cos\psi. \quad (6\text{-}102)$$

Значения k_{ad} и k_{aq} определяются по кривым полей, созданных синусоидально распределенными н. с. F_d и F_q, и кривой поля обмотки возбуждения, н. с. которой принимается равномерно распределенной вдоль полюсного деления τ. Кривые полей можно найти путем построения магнитных линий в зазоре с учетом формы очертания полюсного наконечника, значений $\alpha_р = b_р/\tau$ и отношения δ/τ*.

Значения k_{ad} и k_{aq} в зависимости от $\alpha_р$ для различных отношений δ/τ при $\delta_м/\delta = 1$; 1,5; 2 даны на рис. 6-23. Они определены по кривым полей, найденным путем построения магнитных линий в зазоре (без учета насыщения).

В случае насыщенной машины нельзя считать, что продольное и поперечное поля существуют независимо одно от другого. Однако точный учет их взаимного влияния весьма сложен и выполнить его можно только приближенно.

Обратимся к приближенному методу, основанному на исследованиях Рихтера [Л. 14, 2]. Им были построены кривые полей машины при различных ее нагрузках, значениях угла ψ и насыщениях; при этом принималось, что степень насыщения в основном определяется отношением $F_{\delta zc}/F_\delta$, т. е. отношением суммы магнитных напряжений зазора, зубцов и ярма статора ($F_{\delta zc} = F_\delta + F_z + F_c$) к магнитному напряжению зазора F_δ. Оказалось возможным приближенно считать, что влияние поперечного поля на продольное аналогично тому же влиянию в машинах постоянного тока, но здесь следует учитывать уменьшение первой гармоники кривой продольного поля от действия поперечного поля, а не среднего значения ординат этой кривой.

Из кривых действительных полей машины при нагрузке определялись амплитуды их первых гармоник и по ним амплитуды первых

* Методы расчета активного сопротивления $r_а$ и индуктивного сопротивления рассеяния x_σ обмотки якоря приведены в гл. 7.

* Можно те же кривые найти при помощи модели зазора, сделанной из бумаги с нанесенным на нее проводящим слоем.

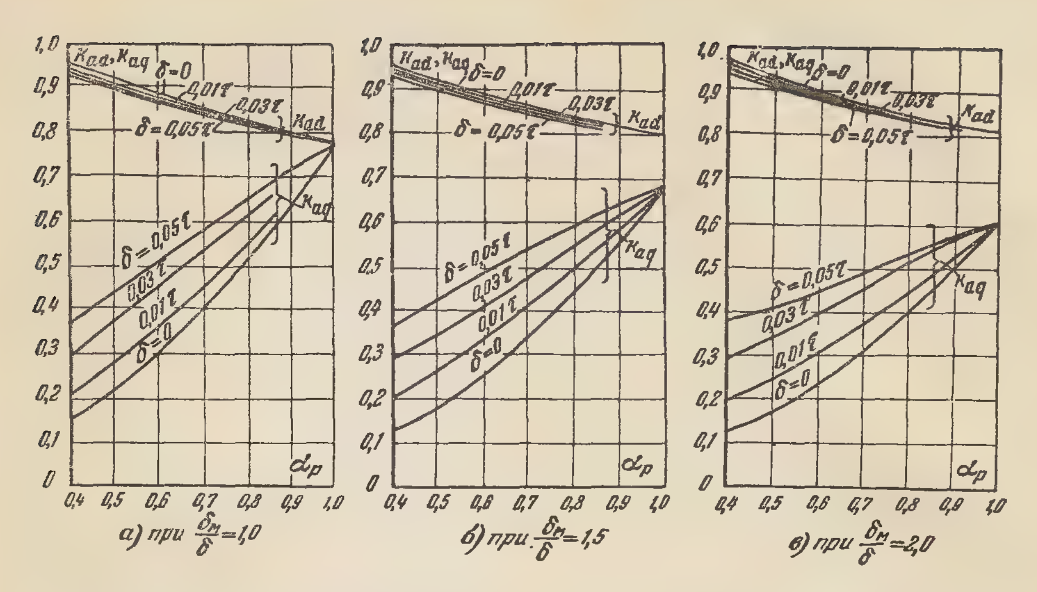


Рис. 6-23. Зависимость коэффициентов k_{ad} и k_{aq} от α_p для различных значений $\frac{\delta}{\tau}=\text{const}$.

гармоник полей продольного B_{d1} и поперечного B_{q1}; затем по характеристике $B_1=f(F_в)$ находились н. с. F'_{ad} и F'_{aq}, следовательно, с учетом насыщения.

Сравнивая F''_{ad} с F_{ad}, можно установить значения коэффициента $\varkappa_d$, на который нужно умножить k_{ad}, чтобы получить F''_{ad} с учетом насыщения. Аналогично определялись значения коэффициента $\varkappa_q$, на который нужно умножить коэффициент k_{aq}, чтобы учесть влияние насыщения на поперечное поле.

Значения $\varkappa_d$ и $\varkappa_q$ были найдены в зависимости от отношения $F_{\delta zc}/F_\delta$ для равномерного зазора ($\delta_м/\delta=1$) и для зазора, изменяющегося согласно уравнению

$$\delta_x=\frac{\delta}{\cos\frac{x\pi}{\tau}}, \qquad (6\text{-}103)$$

где x — расстояние от оси полюса до рассматриваемой точки.

Кривые зависимости $\bar{\varkappa}_d$, $\tilde{\varkappa}_d$ и $\bar{\varkappa}_q$, $\tilde{\varkappa}_q$ от $F_{\delta zc}/F_\delta$ представлены на рис. 6-24, где $\bar{\varkappa}_d$ и $\bar{\varkappa}_q$ относятся к машинам с равномерным зазором ($\delta_м/\delta=1$), а $\tilde{\varkappa}_d$ и $\tilde{\varkappa}_q$ — к машинам с зазором, изменяющимся согласно (6-103).

Если обратиться к кривым полей, найденным при различных $F_{\delta zc}$ и $\psi=0$, то можно будет оценить

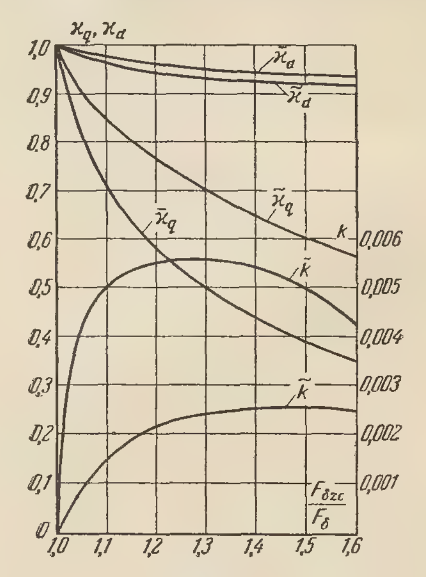


Рис. 6-24. Зависимость коэффициентов $\varkappa_d$, $\varkappa_q$ и k от $F_{\delta zc}/F_\delta$.

влияние поперечного поля на продольное (имеется в виду уменьшение 1-й гармоники кривой продольного поля). Для компенсации этого

влияния необходима добавочная продольная н. с. при $\delta_м/\delta=1$

$$\overline{F}_{qd}=\overline{k}\,\frac{b_р}{\delta}\,F_a\cos\psi, \qquad (6\text{-}104)$$

а при зазоре, изменяющемся согласно (6-103),

$$\widetilde{F}_{qd}=\widetilde{k}\,\frac{\tau}{\delta}\,F_a\cos\psi. \qquad (6\text{-}105)$$

На рис. 6-24 представлены зависимости $\overline{k}$ и $\widetilde{k}$ от $F_{\delta zc}/F_\delta$. Последняя величина находится при помощи кривой $E_0(F_{\delta zc})$, представленной вместе с характеристикой холостого хода $E_0(F_в)$ на рис. 6-25. $F_{\delta zc}$ следует взять для результирующей э. д. с. E_r, полученной из векторной диаграммы генератора (см. рис. 6-22, *а*) или двигателя (рис. 6-22, *б*). F_δ для E_r может быть взята, как показано на рис. 6-25, по прямолинейной характеристике, которая является продолжением начальной части кривой $E_0(F_{\delta zc})$.

Из предыдущего следует, что поперечная н. с. якоря с учетом насыщения, отнесенная к обмотке возбуждения, при $\delta_м/\delta=1$

$$F'_{aq}=\overline{\varkappa}_q\,k_{aq}\,F_a\cos\psi, \qquad (6\text{-}106)$$

а при зазоре, изменяющемся согласно (6-103),

$$F'_{aq}=\widetilde{\varkappa}_q\,k_{aq}\,F_a\cos\psi. \qquad (6\text{-}107)$$

Значения k_{aq} нужно взять из кривых на рис. 6-23, а значения $\overline{\varkappa}_q$ или $\widetilde{\varkappa}_q$ — из кривых на рис. 6-24 в зависимости от $F_{\delta zc}/F_\delta$.

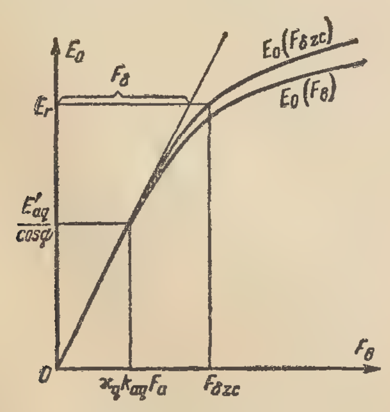


Рис. 6-25. К определению $F_{\delta zc}/F_\delta$ и угла ψ.

Как указывалось, в современных машинах по технологическим соображениям очертание полюсного наконечника делается по дуге радиуса $R_р$ [см. (6-14)], чтобы получилось $\delta_м/\delta=1{,}5\div2$. Изменение зазора при этом не будет соответствовать (6-103). Следовательно, должны несколько измениться коэффициенты $\widetilde{\varkappa}_d$, $\widetilde{\varkappa}_q$ и $\widetilde{k}$. Однако с некоторым приближением будем считать, что они мало изменяются и что их значения при $\delta_м/\delta=1{,}5\div2$ можно брать из кривых на рис. 6-24.

Для расчета F''_{ad} и F'_q необходимо найти угол ψ. Его определение производится следующим образом: по кривой $E_0(F_{\delta zc})$ на рис. 6-25 для $\varkappa_q k_{aq} F_a$ находим величину $E'_{aq}/\cos\psi$ и откладываем ее на продолжении Ix_σ, как показано на рис. 6-22, *а* (или 6-22, *б*); полученную точку Q соединяем с началом векторов $\dot{U}_н$, $\dot{E}_r$ (или $-\dot{E}_r$); отсюда находим направление э. д. с. от продольного поля и, следовательно, угол ψ.

Опустив перпендикуляр из конца $\dot{E}_r$ (или $-\dot{E}_r$) на линию, сдвинутую относительно $\dot{I}$ на угол ψ, получим с учетом насыщения э. д. с. E'_{aq}, наведенную поперечным потоком, и э. д. с. E_{rd}, наведенную продольным потоком.

Теперь можно найти продольную н. с. F'_{ad}, соответствующую продольной реакции якоря, с учетом влияния поперечного поля. Она равна при $\delta_м/\delta=1$:

$$F'_{ad}=F''_{ad}+\overline{F}_{qd}=\overline{\varkappa}_d\,k_{ad}\,F_a\sin\psi+$$
$$+\overline{k}\,\frac{b_р}{\delta}\,F_a\cos\psi \qquad (6\text{-}108)$$

и приближенно при $\delta_м/\delta=1{,}5\div2$

$$F'_{ad}\approx F''_{ad}+\widetilde{F}_{qd}=\widetilde{\varkappa}_d\,k_{ad}\,F_a\sin\psi+$$
$$+\widetilde{k}\,\frac{\tau}{\delta}\,F_a\cos\psi; \qquad (6\text{-}109)$$

здесь коэффициент k_{ad} следует взять по рис. 6-23, а коэффициенты $\overline{\varkappa}_d$, $\overline{k}$ или $\widetilde{\varkappa}_d$, $\widetilde{k}$ — по рис. 6-24 для ранее найденного отношения $F_{\delta zc}/F_\delta$.

Для определения $F_{в.н}$ нужно по данным расчета характеристики хо-

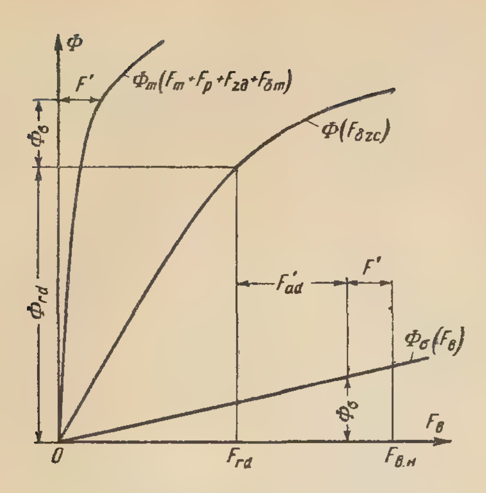


Рис. 6-26. Определение $F_{в\text{-}н}$ явнополюсной синхронной машины.

лостого хода построить частичные магнитные характеристики (рис. 6-26): $Ф(F_{\delta zc})$; $Ф_m(F_m+F_р+F_{zд}+F_{\delta m})$; $Ф_\sigma(F_в)$. Электродвижущая сила E_{rd} наводится продольным потоком в воздушном зазоре

$$Ф_{rd}=\frac{E_{rd}\cdot 10^8}{4k_B\,fk_o\,w},\ мкс.$$

Для его создания необходима н. с. F_{rd}, которую находим по кривой $Ф(F_{\delta zc})$. Поток рассеяния полюсов создается н. с. $F_{rd}+F'_{ad}$ (эта н. с. действует между краями полюсных наконечников соседних полюсов). По кривой $Ф_\sigma(F_в)$ для $F_{rd}+F'_{ad}$ находим $Ф_\sigma$. В полюсах и ярме ротора будем иметь поток $Ф_{rd}+Ф_\sigma$. Для этого потока определяем магнитное напряжение F', равное сумме магнитных напряжений роторных участков магнитной цепи.

Следовательно, как показано на рис. 6-26, искомая н. с. обмотки возбуждения явнополюсной синхронной машины при ее нагрузке равна:

$$F_{в.н}=F_{rd}+F'_{ad}+F'. \quad (6\text{-}110)$$

При расчете обмотки возбуждения берется для запаса $(1{,}1\div1{,}2)$ $F_{в.н}$*.

* Изложенная методика определения $F_{в.н}$ пояснена в примере расчета (см. § 14-12).

На ряде заводов при определении $F_{в.н}$ явнополюсных машин также применяется более простая диаграмма Потье (Potier). Ее построение приведено на рис. 6-27. Вначале должны быть построены векторы $\dot U_н$ и $\dot I_н$ для заданного угла $\varphi_н$. Затем к $\dot U_н$ прибавляются $\dot I_н r_a$ и $j\dot I_н x_р$, где $x_р\approx(1{,}15\div1{,}30)x_\sigma$ — расчетное индуктивное сопротивление (ГОСТ 10169-62), называемое также индуктивным сопротивлением Потье. Далее для $\dot E_r=\dot U_н+\dot I_н r_a+j\dot I_н x_р$ по характеристике холостого хода определяется результирующая н. с. F_r. После этого строится, как показано на рис. 6-27, диаграмма н. с. $-\dot F_r+\dot F'_a=-\dot F_{в.н}$, где F'_a принимается равной $k_{ad}F_a$. Аналогично производится построение диаграммы Потье для приближенного определения $F_{в.н}$ синхронного двигателя.

Беря $x_р$, несколько превышающее x_σ, мы с некоторым приближением учитываем, что в действительности поток рассеяния полюсов соответствует большей н. с., чем F_r, и вследствие этого магнитные напряжения роторных участков магнитной цепи возрастут (см. рис. 6-26). Увеличение $x_р$ по сравнению с x_σ зависит от $\cos\varphi_н$ (имеется в виду работа генератора с отстающим током и двигателя с опережающим током) и главным образом от индук-

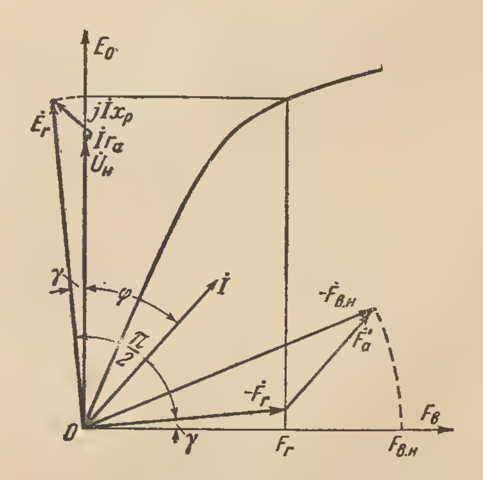


Рис. 6-27. Определение н. с. обмотки возбуждения $F_{в.н}$ по диаграмме Потье.

ции B_m в сердечнике полюса: оно тем больше, чем ниже $\cos\varphi_н$ и чем больше B_m. При $\cos\varphi_н=0,8 \div 09$ для нормальных машин можно принять $x_р \approx 1,2\, x_\sigma$. При работе генератора с опережающим током и двигателя с отстающим током $x_р \approx x_\sigma$.

Здесь также при расчете обмотки возбуждения следует для запаса взять $(1,1 \div 1,2) F_{в.н}$.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ И ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТОК

7-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТОК

Принято различать сопротивление обмотки постоянному току и сопротивление обмотки переменному току. Первое часто называют омическим сопротивлением. Оно определяется известным соотношением

$$r = \rho \frac{L}{s}, \ ом. \qquad (7\text{-}1)$$

Длина проводников обмотки L должна быть взята в метрах, сечение проводника s — в квадратных миллиметрах. Удельное сопротивление ρ для меди при температуре 20° С принимается равным $^1/_{56}=$ $=0,01785$ *ом · мм²/м*.

Согласно ГОСТ 183-66 за *расчетную рабочую температуру* для обмоток с изоляцией класса А, Е или В принимается температура 75° С, а для обмоток с изоляцией класса F или Н 115° С. При определении активных падений напряжения и электрических потерь в обмотках, которые учитываются при расчете к. п. д. и характеристик машины, сопротивления обмоток должны быть приведены к расчетной рабочей температуре. При расчетном определении превышений температуры частей машины электрические потери в обмотках рассчитываются для их сопротивлений, приведенных к температуре, равной указанной в табл. 11-1 плюс 40° С (см. гл. 11).

В табл. 7-1 приведены значения удельных проводимостей $\gamma = 1/\rho$ материалов, применяемых для обмоток якорей машин постоянного и переменного тока, в том числе для обмоток фазных роторов асинхронных машин, а также для обмоток возбуждения, добавочных полюсов, компенсационных и успокоительных.

Таблица 7-1

Удельная проводимость γ, *м/ом · мм²*

Материал обмотки	Расчетная температура, °С		
	20	75	115
Медь	56	46	41
Алюминий	34	28	25

Удельное сопротивление при температуре ϑ° С определяется по формуле

$$\frac{1}{\gamma_\vartheta} = \frac{1}{\gamma_{20}} [1 + \alpha(\vartheta - 20)], \qquad (7\text{-}2)$$

где температурный коэффициент для меди и алюминия $\alpha \approx 0,004$.

Сопротивление обмотки при переменном токе называется активным сопротивлением. Оно равно:

$$r_a = k_r r. \qquad (7\text{-}3)$$

Коэффициент k_r в общем случае больше единицы. Умножением омического сопротивления на k_r учитывается повышение потерь, вызванное полями рассеяния, в том числе пазовым полем рассеяния. Последнее наводит в толще проводников вихревые токи и тем самым обусловливает неравномерное распределение плотности тока по сечению проводников.

С целью уменьшения k_r при больших сечениях проводника его

подразделяют на элементарные проводники (сечением не больше 16—18 *мм*²), причем они укладываются в пазу плашмя, как показано на рис. 7-1, где изображен паз статора большой машины переменного тока (см. также приложение VII).

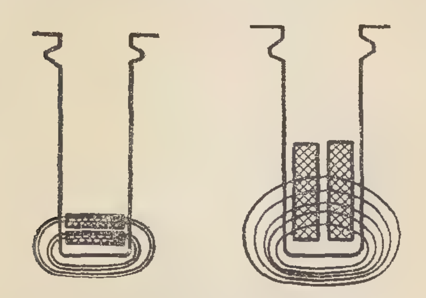


Рис. 7-1. Укладка проводников в пазу статора машины переменного тока.

Рис. 7-2. Укладка проводников в пазу якоря машины постоянного тока.

Высоту проводника для обмотки статора при частоте тока 50 *гц*, если по высоте паза укладывается 8 и более проводников, не следует брать больше примерно 2,5 *мм*, так как при большей высоте резко возрастают потери от вихревых токов, наведенных в проводниках пазовым полем рассеяния.

Для мощных машин (турбогенераторы и крупные гидрогенераторы) при стержневой обмотке применяются искусственные стержни, состоящие из элементарных проводников, особым образом переплетенных (транспонированных), таким образом, чтобы части их располагались в разных местах по высоте паза и чтобы э. д. с., наведенные пазовым полем рассеяния в отдельных элементарных проводниках, были по возможности одинаковыми. В этом случае удается значительно снизить потери от «циркуляционных» токов, проходящих по элементарным проводникам и замыкающихся в «паяных» головках секций.

В больших асинхронных и явнополюсных синхронных машинах при катушечной обмотке скрутка элементарных проводников для уменьшения потерь от циркуляционных токов выполняется только на лобовых частях (в «гнутых» головках катушек).

Для машин постоянного тока укладка проводников в пазу обычно производится, как показано на рис. 7-2. Здесь также в больших машинах для уменьшения потерь от вихревых токов в проводниках не следует брать высоту их больше некоторых определенных значений; например, при частоте $f=pn/60=$ $=50$ *гц* высота проводника не должна быть больше приблизительно 7,8 *мм* (см. гл. 12).

а) **Машины постоянного тока.** *Длина обмотки якоря*

$$L_a = Nl_{\text{ср}},\ м, \qquad (7\text{-}4)$$

где N — число проводников обмотки;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина полувитка, *м* (см. § 3-10).

Сопротивление обмотки якоря при $2a$ параллельных ветвях и сечении s_a *мм*² эффективного проводника обмотки

$$r_a = \rho \frac{L_a}{s_a (2a)^2},\ ом. \qquad (7\text{-}5)$$

Сопротивления обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов, а также компенсационной обмотки, если она имеется, определяются аналогичным образом (см. гл. 12).

б) **Асинхронные машины.** *Сопротивление фазы статорной обмотки*

$$r_1 = k_r \rho \frac{L_1}{s_c a_1},\ ом; \qquad (7\text{-}6)$$

здесь L_1 — длина проводников фазы обмотки на одну параллельную ветвь, *м*:

$$L_1 = 2w_1 l_{\text{ср}},\ м, \qquad (7\text{-}7)$$

где w_1 — число последовательно соединенных витков фазы, т. е. число витков, которым при данном магнитном потоке определяется значение э. д. с. в фазе обмотки;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина полувитка (см. § 4-7);

s_c — сечение эффективного проводника ($s_c = n_{\text{эл}} s_{\text{эл}}$, где $n_{\text{эл}}$ — число элементарных

проводников; $s_{эл}$ — сечение элементарного проводника);

a_1 — число параллельных ветвей фазы обмотки.

При расчете асинхронных машин обычно принимается $k_r = 1$. Учет потерь от вихревых токов, наведенных полями рассеяния, производится при определении добавочных потерь при нагрузке.

Сопротивление фазы роторной обмотки r_2 для машины с контактными кольцами определяется по формуле, аналогичной (7-6), но коэффициент k_r здесь следует принять равным единице, имея в виду малую частоту тока в роторе.

Сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора,

$$r_2' = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}} \right)^2, \qquad (7\text{-}8)$$

где w_2 — число последовательно соединенных витков фазы обмотки ротора; m_1 и m_2 — числа фаз обмоток статора и ротора; k_{o1} и k_{o2} — их обмоточные коэффициенты.

Для короткозамкнутой обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, расчет активных сопротивлений производится следующим образом.

Беличью клетку можно рассматривать как многофазную обмотку, имеющую число фаз, равное числу пазов Z_2, причем здесь в каждую фазу входит один стержень и, следовательно, $w_2 = 1/2$. На рис. 7-3, *а* схематически изображена обмотка ротора в виде клетки. Здесь показаны токи в стержнях и частях короткозамыкающего кольца, лежащих между серединами соседних стержней. Эти части следует считать за сопротивления, соединенные многоугольником. Поэтому токи в стержнях i_1, i_2, i_3... должны рассматриваться как линейные, а токи в частях кольца i_{12}, i_{23}, i_{34}... — как фазные. В соответствии с этим на рис. 7-4 построена векторная диаграмма токов в соседних частях кольца $I_к$ и стержне $I_с$. Сдвиг по фазе токов в соседних стержнях и частях кольца равен:

$$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_2}. \qquad (7\text{-}9)$$

Из векторной диаграммы находим соотношение между $I_к$ и $I_с$:

$$I_к = I_с \frac{1}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}. \qquad (7\text{-}10)$$

Для расчета заменим сопротивления частей кольца, соединенные многоугольником, сопротивлениями,

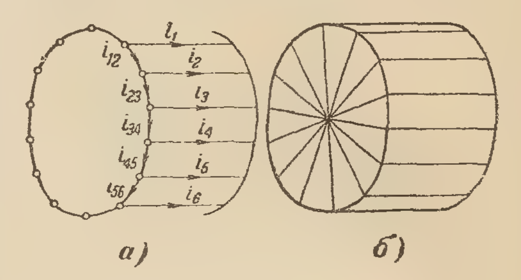


Рис. 7-3. Беличья клетка и эквивалентная ей обмотка.

соединенными звездой, после чего получим эквивалентную обмотку, показанную на рис. 7-3, *б*. Сопротивление фазы r_2 такой обмотки принимается за сопротивление фазы беличьей клетки. Оно определяется из равенства

$$Z_2 I_с^2 r_2 = Z_2 I_с^2 r_с + 2Z_2 I_к^2 r_к, \qquad (7\text{-}11)$$

где $r_с$ — сопротивление стержня;

$r_к$ — сопротивление части кольца между соседними стержнями.

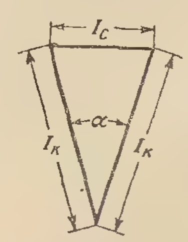


Рис. 7-4. Векторная диаграмма токов в стержне $I_с$ и соседних частях кольца $I_к$.

Сопротивления $r_с$ и $r_к$ определяются в соответствии с рис. 7-5 по следующим формулам:

$$r_с = \rho \frac{l_2' \cdot 10^{-2}}{s_с}, \ ом; \qquad (7\text{-}12)$$

$$r_к = \rho \frac{\pi D_к \cdot 10^{-2}}{Z_2 (ab)}, \ ом, \qquad (7\text{-}13)$$

где $\rho = 1/\gamma$ — удельное сопротивление материала, примененного для клетки, при расчетной рабочей тем-

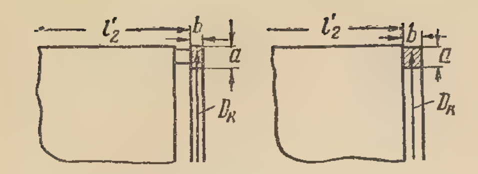


Рис. 7-5. Размеры короткозамыкающих колец беличьей клетки.

пературе (см. табл. 7-2); l_2' и $D_к$ — размеры стержня и кольца, *см*; s_c — сечение стержня, *мм*^{2}; a и b — размеры кольца, *мм*.

Таблица 7-2

Удельная проводимость γ, *м/ом·мм*^{2}

Материал стержня, колец	Марка материала	Расчетная температура, °С		
		20	75	115
Медь	—	56	46	41
Алюминий	Чистый	30	25	22,5
	АКМ 12-4 АКМ 10-2	15	13,5	12
	АКЦ 11-15 АКМ 1—9	12	11	10
Латунь	ЛС 59-1	15,5	13,5	12,5
	Л 62	14	13	12
	ЛЦМ 58-2	8,5	7,4	6,8

Примечание. При изоляции обмотки статора класса А, Е или В принимать расчетную температуру 75° С, при классе F или Н 115° С. (Для литой клетки из «чистого» алюминия можно принять $\gamma=23$ для всех классов изоляции обмотки статора; при этом учитывается уменьшение γ вследствие неизбежных примесей, попадающих в алюминий при его расплавлении и заливке им пазов.)

Из (7-11) и (7-10) имеем:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_к}{\Delta^2}, \quad (7\text{-}14)$$

где

$$\Delta = 2\sin\frac{\pi p}{Z_2}. \quad (7\text{-}15)$$

Коэффициент приведения параметров беличьей клетки к обмотке статора

$$v = \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}}\right)^2 = \frac{4m_1 (w_1 k_{o1})^2}{Z_2}, \quad (7\text{-}16)$$

так как

$$m_2 = Z_2;\ w_2 = \frac{1}{2};\ k_{o2} = 1.$$

Следовательно, приведенное сопротивление роторной обмотки *

$$r_2' = r_2 v = r_2\frac{4m_1 (w_1 k_{o1})^2}{Z_2}. \quad (7\text{-}17)$$

Коэффициент k_r, учитывающий увеличение активного сопротивления беличьей клетки, при малых скольжениях s асинхронных двигателей, когда $s<8 \div 10\%$, может быть принят равным единице, но при больших скольжениях он заметно возрастает, достигая при $s=1$ значений 3—3,5 и больше, например при глубоких пазах ротора.

Более подробные сведения о расчете k_r и r_c при различных формах сечений стержня и паза сообщаются в гл. 13.

в) **Синхронные машины.** Сопротивление фазы якорной (обычно статорной) обмотки определяется тем же соотношением (7-6), что и для статорной обмотки асинхронной машины.

Определение сопротивлений обмоток возбуждения и успокоительной рассматривается в гл. 14.

7-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТОК

В общей теории электрических машин принято различать главное потокосцепление и потокосцепление рассеяния обмотки статора или ротора. Первое создается главным потоком Ф, проходящим через воздушные зазоры и сцепляющимся с обеими обмотками машины. Второе создается полем рассеяния, сцепляющимся только со своей обмоткой. В соответствии с этим имеем, например, для обмотки статора асинхронной машины:

$$x_{11} = x_{1г} + x_1,$$

где x_{11} и $x_{1г}$ — полное и главное индуктивные сопротивления;
x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния.

* Если имеется скос пазов статора или ротора, то следовало бы в знаменатели выражений (7-16) и (7-17) ввести $k_{ск}^2$; однако в обычных случаях $k_{ск}>0{,}99$, поэтому здесь можно принять $k_{ск}^2=1$ (см. § 13-7, д).

Аналогичные уравнения могут быть написаны для обмоток ротора асинхронной машины и статора синхронной машины. В первом случае индуктивное сопротивление рассеяния обозначается через x_2, во втором — через x_σ.

При отсутствии скоса пазов на статоре и роторе* главное индуктивное сопротивление обмотки статора равно индуктивному сопротивлению взаимной индукции, приведенному к обмотке статора:

$$x_{1г} = x_{12}.$$

В применении к синхронной машине индуктивные сопротивления взаимной индукции по продольной и поперечной осям обозначаются соответственно через x_{ad} и x_{aq}.

Главное индуктивное сопротивление обмотки статора асинхронной машины может быть найдено из соотношения

$$x_{1г} = \frac{E}{I_\mu},$$

если воспользоваться формулами (6-76) для E и (6-85) для I_μ и учесть, что $\Phi = \alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta$, $F_{цепи} = 1{,}6\,\delta'' B_\delta$, где

$$\delta'' = \delta k_\delta \frac{F_{цепи}}{F_\delta} = \delta k_\delta k_\mu; \quad (7\text{-}18)$$

здесь $k_\mu = F_{цепи}/F_\delta$ — коэффициент насыщения.

После преобразований при $m_1 = 3$ получим:

$$x_{1г} = A_x \lambda_0, \quad (7\text{-}19)$$

где

$$A_x = 0{,}158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq_1}; \quad (7\text{-}20)$$

$$\lambda_0 = 0{,}427 q_1 \frac{k_B \alpha_\delta \tau}{\delta''} k^2_{01}. \quad (7\text{-}20a)$$

Здесь λ_0 представляет собой безразмерную величину, которую можно назвать коэффициентом магнитной проводимости для главного потока.

---

* Об учете скоса пазов см. § 13-7, д.

Приближенно можно считать, что $x_{1г}$ обусловлено первой гармоникой поля статора.

Аналогичным образом определяется главное индуктивное сопротивление обмотки ротора $x_{2г}$.

Точное определение потокосцеплений рассеяния, а следовательно, и индуктивных сопротивлений x_1, x_2 и x_σ представляет собой значительно более сложную задачу. Поэтому при практических расчетах довольствуются приближенными методами, достаточная точность которых подтверждается опытом.

Поле рассеяния условно делится на три части; в соответствии с этим различают три вида рассеяния: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмотки. Если ввести коэффициенты магнитной проводимости — пазового рассеяния $\lambda_п$, дифференциального рассеяния $\lambda_д$ и рассеяния лобовых частей $\lambda_л$, отнесенные к единице расчетной длины статора или ротора l_δ, то аналогично (7-19) и (7-20) можем написать формулу для индуктивного сопротивления рассеяния:

$$x = 0{,}158 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq} \Sigma\lambda, \ ом, \quad (7\text{-}21)$$

где

$$\Sigma\lambda = \lambda_п + \lambda_д + \lambda_л. \quad (7\text{-}22)$$

Расчет x, следовательно, сводится к расчету указанных коэффициентов проводимости рассеяния. Сначала рассмотрим определение этих коэффициентов применительно к асинхронным машинам.

а) **Асинхронные машины.** 1. *Пазовое рассеяние.* Коэффициент проводимости пазового рассеяния $\lambda_п$ для диаметральных двухслойных обмоток (при $\beta = y/\tau = 1$) и однослойных обмоток зависит только от геометрических размеров паза. Его значение определяется по потокосцеплению индукционных линий, проходящих поперек паза, с проводниками, лежащими в пазу. При этом пренебрегают магнитным сопротивлением индукционных трубок пазового поля рассеяния вне паза и считают, что сопротивление для них определяется только расстояниями

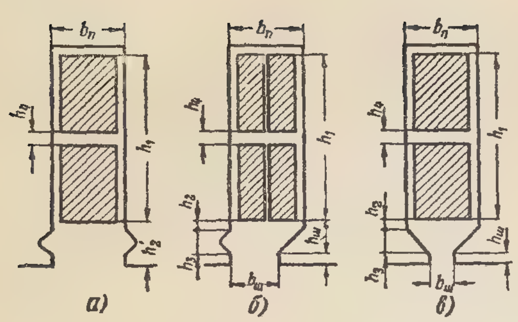


Рис. 7-6. Прямоугольные пазы.

между стенками паза и между усиками зубцов.

Для хордовых двухслойных обмоток коэффициент $\lambda_п$ зависит также от значения β, так как при $\beta \neq 1$ в некоторых пазах находятся катушечные стороны, принадлежащие разным фазам, вследствие чего общее потокосцепление какой-либо катушечной стороны в этих пазах уменьшается. Это уменьшение потокосцепления, а следовательно, и $\lambda_п$ учитывается посредством введения в расчетные формулы для $\lambda_п$ коэффициентов k_β и k'_β, зависящих от β.

Для прямоугольных пазов значения $\lambda_п$ определяются по следующим формулам*.

Открытый паз (рис. 7-6, *а*):

$$\lambda_п = \frac{h_1 - h_4}{3b_п} k_\beta + \frac{h'_2}{b_п} k'_\beta + \frac{h_4}{4b_п}; \qquad (7\text{-}23)$$

полуоткрытый и полузакрытый пазы (рис. 7-6, *б* и *в*):

$$\lambda_п = \frac{h_1 - h_4}{3b_п} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_п} + \frac{3h_3}{b_п + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k'_\beta + \frac{h_4}{4b_п} \qquad (7\text{-}24)$$

[размеры h_1 и h_4 следует определить по голой меди в верхней и нижней частях катушечных сторон; для однослойных обмоток $h_4 = 0$, $k_\beta = 1$; $k'_\beta = 1$; формулы и кривые для k_β и k'_β — (7-27)—(7-29), рис. 7-8].

Для трапецеидальных пазов значения $\lambda_п$ определяются по приведенным ниже формулам.

Полукруглая часть у открытия паза (рис. 7-7, *а*, *б* и *д*):

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b} k_\beta + \left(0{,}785 - \frac{b_ш}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k'_\beta; \qquad (7\text{-}25)$$

трапецеидальная часть у открытия паза (рис. 7-7, *в*, *г* и *е*):

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_3}{b + 2b_ш} + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k'_\beta \qquad (7\text{-}26)$$

[формулы можно применять как для однослойных, так и для двухслойных обмоток, причем для последних при сокращении шага $k_\beta < 1$ и $k'_\beta < 1$; для пазов с полукруглой частью у открытия паза, в случае если кромка обмотки переходит через центр полуокружности, величину h_2 следует считать отрицательной; для пазов с полукруглым дном размер h_1 определяется высотой меди за вычетом $^1/_{10}$ диаметра дна паза (рис. 7-7, *а*, *в*, *д* и *е*)].

Коэффициенты k_β и k'_β зависят от шага обмотки $\beta = y/\tau$ и определяются по следующим формулам:

$$k_\beta = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} k'_\beta; \qquad (7\text{-}27)$$

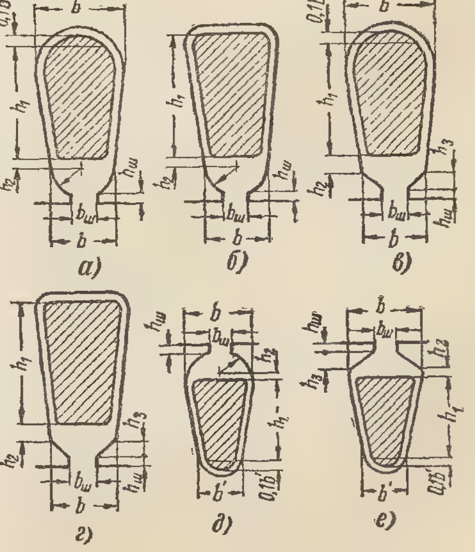


Рис. 7-7. Трапецеидальные пазы.

* Обозначения в формулах соответствуют обозначениям, указанным на рисунках. Во все приведенные ниже формулы для $\lambda_п$ следует подставлять размеры паза «в штампе» [Л. 54].

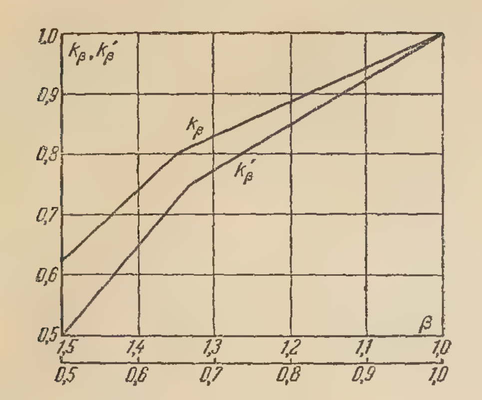


Рис. 7-8. Зависимость k_β и k''_β от шага обмотки β.

$$k'_\beta = \frac{1+3\beta}{4}\left(\text{при } \frac{2}{3} \leqslant \beta \leqslant 1\right); \quad (7\text{-}28)$$

$$k'_\beta = \frac{6\beta-1}{4}\left(\text{при } \frac{1}{3} \leqslant \beta \leqslant \frac{2}{3}\right). \quad (7\text{-}29)$$

Если $1 < \beta \leqslant 2$, то в формулы для k'_β вместо β надо подставлять $(2-\beta)$.

В соответствии с (7-27)—(7-29) на рис. 7-8 построены зависимости коэффициентов k_β и k'_β от шага обмотки β. По приведенным формулам определяются значения $\lambda_\text{п}$ для обмоток статора синхронных и асинхронных машин, а также для обмоток фазного ротора асинхронных машин.

Для обмоток ротора в виде беличьей клетки при определении $\lambda_\text{п}$ применяются следующие ниже формулы.

Круглый паз (рис. 7-9):

$$\lambda_\text{п} = \left(0{,}785 - \frac{b_\text{ш}}{2b}\right) + \frac{h_\text{ш}}{b_\text{ш}}; \quad (7\text{-}30)$$

грушевидный или овальный паз (рис. 7-10):

$$\lambda_\text{п} = \left[\frac{h_1}{3b}\left(1 - \frac{\pi b^2}{8s_\text{c}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_\text{ш}}{2b}\right] + \frac{h_\text{ш}}{b_\text{ш}}, \quad (7\text{-}31)$$

где s_c — сечение стержня, *мм*^{2} при b^2 в квадратных миллиметрах (для овального паза $b=b'$); для закрытых пазов ($b_\text{ш}=0$) в (7-30) и (7-31) вместо $h_\text{ш}/b_\text{ш}$ надо подставлять

$$\lambda_\text{ш} = 0{,}3 + 1{,}12\frac{h_\text{ш}\cdot 10^3}{I_2}, \quad (7\text{-}32)$$

где I_2 — ток стержня, *а*; $h_\text{ш}$ — высота усика, *мм* [эмпирическая формула (7-32) применима в случае $I_2 \geqslant 5\ b$, если b — ширина стержня, *мм*];

паз с трапециевидными верхом и дном при литой беличьей клетке (рис. 7-11):

$$\lambda_\text{п} = \left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_3}{b+2b_\text{ш}}\right) + \frac{h_\text{ш}}{b_\text{ш}}; \quad (7\text{-}33)$$

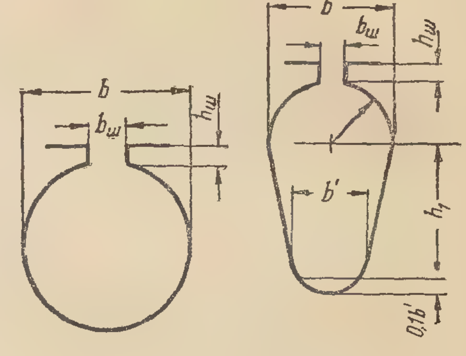


Рис. 7-9. Рис. 7-10.

прямоугольный паз (рис. 7-12):

$$\lambda_\text{п} = \left(\frac{h_1}{3b}\right) + \frac{h_\text{ш}}{b_\text{ш}}; \quad (7\text{-}34)$$

для закрытого паза ($b_\text{ш}=0$) вместо $h_\text{ш}/b_\text{ш}$ надо подставлять

$$\lambda_\text{ш} = 1{,}12\frac{h_\text{ш}\cdot 10^3}{I_2} \quad (7\text{-}35)$$

при $I_2 \geqslant 5\ b$;

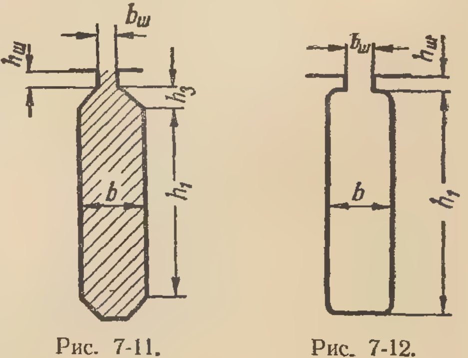


Рис. 7-11. Рис. 7-12.

прямоугольный паз с трапециевидным верхом, не заполненным стержнем (рис. 7-13):

$$\lambda_\text{п} = \left(\frac{h_1}{3b}\right) + \frac{h_2}{b} + \frac{3h_3}{b+2b_\text{ш}} + \frac{h_\text{ш}}{b_\text{ш}}; \quad (7\text{-}36)$$

прямоугольный паз с полукруглым верхом, не заполненным стержнем (рис. 7-14):

$$\lambda_п = \left(\frac{h_1}{3b}\right) + \frac{h_2}{b} + 0{,}785 - \frac{b_ш}{2b} + \frac{h_ш}{b_ш}. \qquad (7\text{-}37)$$

Последние две формулы обычно применяются для определения $\lambda_п$ при глубоких пазах ротора.

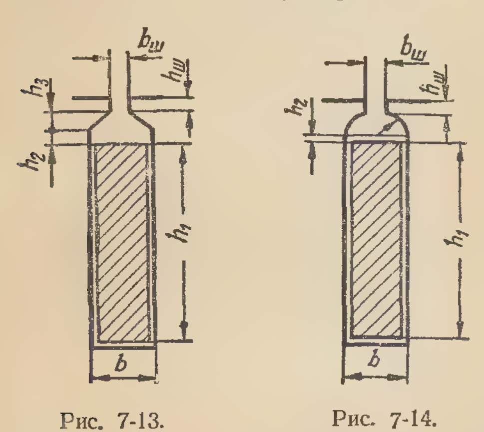


Рис. 7-13. Рис. 7-14.

Все приведенные формулы для пазов ротора при беличьей клетке дают значения $\lambda_п$ без учета вытеснения тока в стержнях; следовательно они могут применяться в случае, когда частота $f_2=sf_1$ относительно, мала, например при $f_2 < 5 \div 10$ *гц*, чему обычно соответствует рабочий режим асинхронного двигателя. При больших значениях f_2 учет вытеснения тока в проводниках ротора производится умножением выражений, заключенных в скобки в правой части формул, на некоторый коэффициент, меньший единицы (см. гл. 13).

Методы расчета $\lambda_п$ с учетом вытеснения тока, а также методы расчета $\lambda_п$ при бутылочных, клинообразных пазах и двойной клетке изложены в гл. 13. Там же показано, как приближенно учитывается при определении $\lambda_п$ насыщение усиков и коронок зубцов от пазового поля рассеяния. Это насыщение оказывает существенное влияние на пусковые характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей.

2. *Дифференциальное рассеяние.* Как ранее указывалось, главное индуктивное сопротивление обмотки статора $x_{1г}$ обусловлено 1-й гармоникой поля, созданного 1-й гармоникой н. с. этой обмотки. При этом было отмечено, что при отсутствии скоса пазов статора и ротора оно равно индуктивному сопротивлению взаимной индукции x_{12}.

Можно считать, что передача энергии от статора к ротору происходит через посредство 1-й гармоники поля. Высшие гармоники поля, созданные высшими гармониками н. с. статора, как известно, наводят в его обмотке э. д. с. основной частоты, т. е. той же частоты, что и 1-я гармоника, тогда как в обмотке ротора при его вращении они наводят э. д. с. высоких частот и поэтому практически не участвуют в передаче энергии от статора к ротору. Следовательно, их потокосцепление с обмоткой статора можно рассматривать как потерю общего потокосцепления или потокосцепление рассеяния этой обмотки. Наведенные ими э. д. с. в сумме дают э. д. с. рассеяния, называемого дифференциальным рассеянием, обусловленным высшими гармониками поля*.

Если сложить э. д. с., наведенные высшими гармониками поля статора, и отнести полученную сумму к э. д. с., наведенной 1-й гармоникой того же поля, то мы получим коэффициент, характеризующий дифференциальное рассеяние:

$$\sigma_{д1} = \frac{\Sigma E_\nu}{E_1} = \frac{x_{д1}}{x_{1г}} = \sum_{\nu \neq 1}^{\infty} \left(\frac{k_{о1\nu}}{\nu k_{о1\cdot 1}}\right)^2, \qquad (7\text{-}38)$$

где $x_{д1}$ — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки статора; $k_{о1\nu}$ — обмоточный

* При упрощенных расчетах вместо дифференциального рассеяния определяют рассеяние между коронками зубцов, составляя при этом расчетные формулы, в основу которых кладутся главным образом опытные данные. Рассматриваемый вид рассеяния называют также «рассеянием в воздушном зазоре», так как магнитные линии полей от высших гармоник н. с. статора проходят в воздушном зазоре подобно магнитным линиям основного поля от первой гармоники н. с. статора.

коэффициент для ν-й гармоники; $k_{o1\cdot 1} = k_{o1}$ — обмоточный коэффициент для 1-й гармоники.

Аналогичные рассуждения могут быть применены и в отношении об-

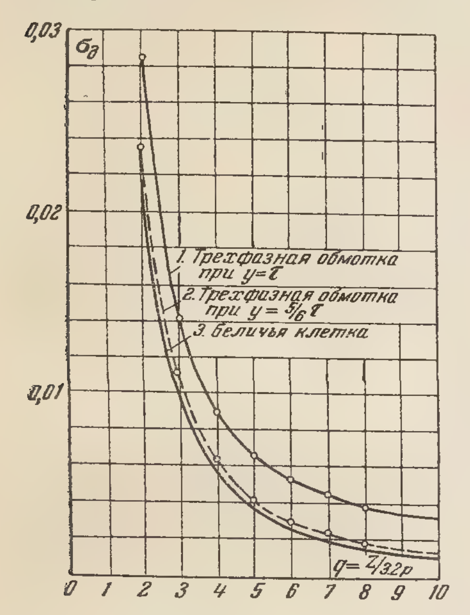


Рис. 7-15. Зависимость коэффициента дифференциального рассеяния $\sigma_д$ от $q = \dfrac{Z}{3 \cdot 2p}$.

1 — трехфазная обмотка при $y=\tau$; *2* — трехфазная обмотка при $y = \dfrac{5}{6}\tau$; *3* — беличья клетка.

мотки ротора, для которой также может быть найден коэффициент $\sigma_{д2}$ дифференциального рассеяния.

Умножив $x_{1г}$ и $x_{2г}$ на коэффициенты $\sigma_{д1}$ и $\sigma_{д2}$, получим индуктивные сопротивления дифференциального рассеяния обмоток статора и ротора:

$$x_{д1} = \sigma_{1д} x_{1г}; \quad x_{д2} = \sigma_{2д} x_{2г}. \qquad (7\text{-}39)$$

Если произвести расчеты по (7-38) для различных значений $q = \dfrac{Z}{3 \cdot 2p}$ и $\beta = y/\tau$ и соответствующих им значений обмоточных коэффициентов, то можно построить кривые

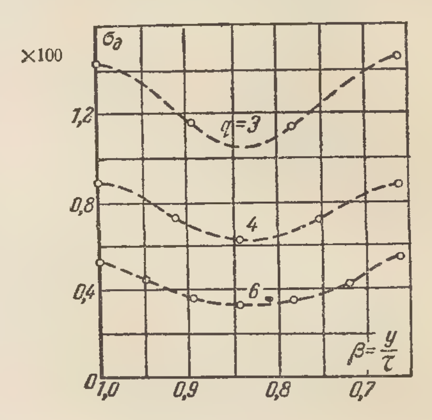


Рис. 7-16. Зависимость $100\sigma_д$ от шага обмотки $\beta = y/\tau$.

зависимости $\sigma_д$ от q для различных β. На рис. 7-15 приведены такие кривые для трехфазной обмотки при шаге $y=\tau$ и наиболее благоприятном шаге $y = \dfrac{5}{6}\tau$, а также для беличьей клетки, причем для последней под $q = \dfrac{Z}{3 \cdot 2p}$ нужно понимать условное число пазов на полюс и фазу.

Таблица 7-2а

Значения $100\sigma_д$ при q=целое число

Укорочение шага в пазовых делениях	$q = \dfrac{Z}{3 \cdot 2p}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11—13
0	9,7	2,85	1,41	0,89	0,65	0,52	0,44	0,39	0,35	0,31	0,30—0,29
1	9,7	2,35	1,15	0,74	0,53	0,45	0,37	0,33	0,32	0,26	0,28—0,28
2		2,85	1,11	0,62	0,44	0,36	0,32	0,26	0,24	0,23	0,22—0,21
3		2,70	1,41	0,69	0,43	0,30	0,29	0,23	0,22	0,20	0,21—0,20
4			1,38	0,89	0,55	0,31	0,25	0,19	0,18	0,14	0,14—0,13
5				0,86	0,65	0,42	0,31	0,21	0,16	0,12	0,11—0,10
6					0,63	0,52	0,32	0,26	0,17	0,13	0,13—0,13
7					0,60	0,52	0,40	0,32	0,22	0,16	0,16—0,15
8						0,55	0,42	0,39	0,30	0,22	0,22—0,21
9							0,44	0,44	0,37	0,28	0,25—0,24
10								0,45	0,39	0,35	0,32—0,31
11										0,36	0,33—0,32

На рис. 7-16 представлены кривые зависимости $100\sigma_д$ от шага обмотки, выраженного в долях полюсного деления. Кривые показывают, как дифференциальное рассеяние зависит от q и β.

В табл. 7-2а приведены значения $100\sigma_д$ для обычных трехфазных обмоток (шестизонных) при q=целое число и различных значениях укорочения шага $\tau-y$.

Таблица 7-2б

Значения $100\ \sigma_д$ при q=дробное число

q	$\beta=\frac{y}{\tau}$	$100\ \sigma_д$ без низших гармоник	$100\ \sigma_д$, включая низшие гармоники	q	$\beta=\frac{y}{\tau}$	$100\ \sigma_д$ без низших гармоник	$100\ \sigma_д$, включая низшие гармоники
$1\frac{1}{10}$	0,909	9,4	—	$2\frac{1}{4}$	0,890	2,0	3,2
	0,609	10,6			0,740	2,1	3,1
$1\frac{1}{8}$	0,887	8,8	—	$2\frac{2}{7}$	0,874	2,0	3,1
	0,592	10,4			0,730	2,1	3,0
$1\frac{2}{5}$	0,952	6,3	7,5	$2\frac{4}{13}$	0,867	2,0	3,0
	0,714	6,9	7,3		0,723	2,1	3,0
$1\frac{1}{2}$	0,890	4,5	4,7	$2\frac{3}{8}$	0,983	2,3	2,8
	0,667	5,9	6,0		0,842	2,2	2,6
$1\frac{7}{11}$	0,815	3,6	4,5	$2\frac{1}{2}$	0,933	1,7	1,8
	0,612	4,1	4,8		0,800	1,7	1,8
$1\frac{5}{7}$	0,972	3,9	5,7	$2\frac{7}{11}$	0,885	1,7	2,0
	0,778	3,5	5,0		0,760	1,8	2,0
$1\frac{3}{4}$	0,953	3,5	5,4	$2\frac{3}{4}$	0,969	1,5	2,3
	0,760	3,4	4,9		0,850	1,3	2,0
$1\frac{4}{5}$	0,926	3,3	5,2	$2\frac{6}{7}$	0,933	1,4	2,3
	0,742	3,4	4,9		0,817	1,3	2,1
$1\frac{7}{8}$	0,890	3,0	5,1	$2\frac{7}{8}$	0,928	1,4	2,3
	0,712	3,4	5,1		0,812	1,5	2,3
$1\frac{11}{13}$	0,903	3,0	5,0	$2\frac{10}{13}$	0,964	1,5	2,4
	0,723	3,3	5,0		0,842	1,4	2,2
$2\frac{1}{11}$	0,958	2,8	4,4	$3\frac{1}{2}$	0,950	1,1	—
	0,798	2,7	3,0		0,857	0,83	
$2\frac{1}{5}$	0,910	2,1	3,4	—	—	—	—
	0,758	2,2	3,3				

Для наиболее часто применяемых трехфазных обмоток (шестизонных) с q=дробное число значения $100\sigma_д$ приведены в табл. 7-2б; для обмоток с дробным q, бо́льшим $3\frac{1}{2}$,

Таблица 7-2в

Значения 100 $\sigma_д$ для беличьей клетки

$q_2=\frac{Z_2}{3\cdot 2p}$	1	2	$2\frac{1}{3}$	$2\frac{2}{3}$	3	$3\frac{1}{3}$	$3\frac{2}{3}$	4	>4
$100\sigma_д$	9,7	2,29	1,68	1,28	1,02	0,82	0,68	0,57	$\frac{9{,}15}{q_2^2}$

можно обратиться к кривым на рис. 7-16 и приближенно считать, что при одном и том же шаге β искомое значение $\sigma_д$ изменяется обратно пропорционально отношению квадратов q.

Приведенные кривые и таблицы показывают, что при малом q значение $\sigma_д$ сильно возрастает и при $q=1$ оно становится чрезмерным. Поэтому для нормальных машин не следует брать $q=1$.

На индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния $x_д=\sigma_д x_г$ оказывают влияние открытия пазов статора и ротора, что приближенно учитывается введением коэффициента k_δ в формулу для $x_г$ и некоторого коэффициента $k_ш$ [см. далее (7-42)]. Труднее учесть влияние насыщения на $x_д$, так как пути потоков, создаваемых гармониками н.с. высоких порядков, отличаются от пути потока, создаваемого первой гармоникой н.с.; однако можно принять, что $x_д$ не зависит от насыщения при токах, не превышающих примерно $1{,}5 I_н$.

В предыдущем мы пренебрегали реакцией токов, наведенных, например, в обмотке ротора высшими гармониками поля статора. Как показывают расчет и опыт, токи, наведенные полем дифференциального рассеяния статора в обмотке фазного ротора, заглушают его лишь в малой степени и в этом случае при $q=$целое число можно брать $\sigma_д$ из табл. 7-2а, не учитывая реакции вторичных токов.

Реакция токов, наведенных в беличьей клетке высшими гармониками поля статора, проявляется более резко. Поэтому их демпфирующее действие следует учесть, что можно сделать, умножив значение $\sigma_д$ по табл. 7-2а или 7-2б на коэффициент демпфирования $\rho_д$, приближенные значения которого приведены в табл. 7-3. Из этой таблицы видно, что при скосе пазов $\rho_д$ возрастает, так как демпфирование гармоник высоких порядков при этом уменьшается. При других скосах пазов, например $b_c=t_1$, можно $\rho_д$ оценить приближенно, взяв его значение близким к приведенным в таблице. Следует отметить, что при литой алюминиевой обмотке вследствие «поперечных» токов, проходящих по стали ротора от стержня к стержню, скос пазов менее эффективен; поэтому здесь $\rho_д$ приближается к $\rho_д$ для нескошенных пазов.

Для обмотки статора с $q_1=$дробное число при роторе с беличьей клеткой значение $\sigma_{д1}$ следует брать из табл. 7-2б без учета низших гармоник поля статора, так как можно считать, что они полностью заглушаются токами в клетке.

При фазном роторе и $q_1=$ дробное число низшие гармоники поля статора заглушаются лишь в небольшой степени, так как обмоточные коэффициенты ротора для них малы, а сопротивления обмотки ротора для наведенных ими токов велики; поэтому значения $\sigma_{д1}$ следует брать из табл. 7-2б с учетом низших гармоник поля статора.

При определении $x_{д2}=\sigma_{д2}x_{2г}$ реакцией токов, наведенных в обмотке статора высшими гармониками поля ротора, имеющего трехфазную обмотку или беличью клетку, можно пренебречь и при $q_2=$целое число или беличьей клетке брать значения $\sigma_{д2}$ из табл. 7-2а или соответственно из табл. 7-2в. Если ротор выполняется с трехфазной обмоткой при $q_2=$ дробное число, то значения $\sigma_{д2}$ сле-

Таблица 7-3

Значения коэффициента демпфирования $\rho_д$

q_1	Z_2/p									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
2	0,99/0,94	0,94/0,87	0,87/0,77							
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	0,81/0,68					
4	0,97/0,90	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	0,74/0,67				
5		0,86/0,78	0,81/0,71	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	0,67/0,62	0,65/0,59		
6		0,82/0,73	0,74/0,67	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	0,61/0,57	0,6/0,55	0,59/0,53	
8		0,78/0,66	0,67/0,58	0,60/0,52	0,56/0,49	0,53/0,47	0,51/0,46	0,49/0,46	0,48/0,44	0,47/0,43

Примечание. Нижние значения (под чертой) относятся к машинам, не имеющим скоса пазов, верхние — к машинам, имеющим скос пазов $b_c \approx t_2$.

дует брать из табл. 7-2б с учетом низших гармоник поля ротора.

При принятом методе расчета удобнее пользоваться коэффициентом проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_д$. В этом случае мы можем сравнить между собой значения $\lambda_п$, $\lambda_д$, $\lambda_л$ и $\Sigma\lambda$ и, таким образом, выяснить, какую долю общего рассеяния составляют его отдельные части.

Значение $\lambda_д$ найдем из (7-38) и (7-19) с учетом (7-20) и (7-20а). При этом, как отмечалось, будем пренебрегать насыщением и для учета открытия пазов введем еще коэффициент $k_ш$. Следовательно, при $k_B\alpha_\delta = 1/\sqrt{2}$; $\tau = 3q_1t_1$; $\delta'' = \delta k_\delta$ получим:

для обмотки статора

$$\lambda_{д1} = 0{,}9\frac{t_1(q_1k_{o1})^2\rho_{д1}k_{ш1}}{\delta k_\delta}\sigma_{д1}; \quad (7\text{-}40)$$

для обмотки ротора

$$\lambda_{д2} = 0{,}9\frac{t_2(q_2k_{o2})^2\rho_{д2}k_{ш2}}{\delta k_\delta}\sigma_{д2}, \quad (7\text{-}41)$$

где при беличьей клетке $q_2 = \frac{Z_2}{3\cdot 2p}$; $k_{o2} = 1$. Значения $\sigma_д$ приведены в табл. 7-2а, 7-2б и 7-2в.

Для машин с контактными кольцами $\rho_{д1} \approx 1$; для машин с короткозамкнутым ротором $\rho_{д1}$ по табл. 7-3. Для обмотки ротора $\rho_{д2} \approx 1$.

Коэффициент $k_{ш1(2)}$ зависит от отношений открытия паза к зазору и пазовому делению, т. е. от $b_{ш1(2)}/\delta$ и $b_{ш1(2)}/t_{1(2)}$. Его приближенное значение при $b_{ш1(2)}/\delta \leqslant 20$ и $b_{ш1(2)}/t_{1(2)} \leqslant 0{,}6$ можно найти по формуле

$$k_{ш1(2)} \approx 1 - 0{,}033\frac{b^2_{ш1(2)}}{t_{1(2)}\delta}. \quad (7\text{-}42)$$

Для короткозамкнутого ротора при полузакрытых и закрытых пазах $k_{ш2} \approx 1$.

3. *Рассеяние лобовых частей.* Коэффициенты проводимости рассеяния лобовых частей обмоток статора рассчитываются по следующим эмпирическим формулам [Л. 54]:

для однослойных двухплоскостной и простой шаблонной обмоток

$$\lambda_{л1} = 0{,}67\frac{q_1}{l'_\delta}(l_{л1} - 0{,}64\tau); \quad (7\text{-}43)$$

для однослойных трехплоскостных обмоток

$$\lambda_{л1} = 0{,}47\frac{q_1}{l'_\delta}(l_{л1} - 0{,}64\tau); \quad (7\text{-}44)$$

для двухслойных обмоток петлевой и волновой, однослойных обмоток цепной и шаблонной «вразвалку»

$$\lambda_{л1} = 0{,}34 \frac{q_1}{l'_\delta} (l_{л1} - 0{,}64\beta\tau), \quad (7\text{-}45)$$

где

$$l'_\delta \approx l_1 - 0{,}5 n_в b_в. \quad (7\text{-}46)$$

Определение $\lambda_{л2}$ для обмоток ротора с контактными кольцами производится по тем же формулам после замены величин q_1, $l_{л1}$, β_1 соответственно величинами q_2, $l_{л2}$, β_2; кроме того, надо вместо l'_δ подставить

$$l''_\delta \approx l_2 - 0{,}5 n_в b_в. \quad (7\text{-}47)$$

Для короткозамкнутой обмотки ротора, если короткозамыкающие кольца прилегают к стали ротора (например, при литой алюминиевой обмотке), расчет $\lambda_{л2}$ производится по следующей формуле:

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 D_к}{Z_2 l''_\delta \Delta^2} \lg \frac{4{,}7 D_к}{a + 2b}, \quad (7\text{-}48)$$

если короткозамыкающие кольца отставлены от стали ротора (например, при двойной клетке), — то по формуле

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 D_к}{Z_2 l''_\delta \Delta^2} \lg \frac{4{,}7 D_к}{2(a + b)}; \quad (7\text{-}49)$$

здесь $\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}$ (см. § 7-1).

4. *Индуктивные сопротивления рассеяния.* В соответствии с (7-21) и (7-22) получим:

индуктивное сопротивление рассеяния статора

$$x_1 = 0{,}158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l'_\delta}{pq_1} \times (\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}),\ ом; \quad (7\text{-}50)$$

индуктивное сопротивление рассеяния ротора с контактными кольцами

$$x_2 = 0{,}158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_2}{100}\right)^2 \frac{l''_\delta}{pq_2} \times (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}),\ ом; \quad (7\text{-}51)$$

для короткозамкнутого ротора

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l''_\delta (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-8},\ ом. \quad (7\text{-}52)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

для ротора с контактными кольцами

$$x'_2 = x_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{о1}}{w_2 k_{о2}}\right)^2,\ ом; \quad (7\text{-}53)$$

для короткозамкнутого ротора

$$x'_2 = x_2 \frac{4 m_1 (w_1 k_{о1})^2}{Z_2},\ ом. \quad (7\text{-}54)$$

При непосредственном расчете x'_2 для короткозамкнутого ротора можно воспользоваться формулой

$$x'_2 = B_x (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}),\ ом, \quad (7\text{-}55)$$

где при $m_1 = 3$

$$B_x = 0{,}948 \frac{f_1}{Z_2} \left(\frac{w_1 k_{о1}}{100}\right)^2 \frac{l''_\delta}{100},\ ом \quad (7\text{-}56)$$

Формулы для расчета индуктивных сопротивлений рассеяния короткозамкнутых обмоток двухклеточного ротора, ротора с глубокими пазами и пазами, утолщенными в нижней части, с учетом вытеснения тока в проводниках приводятся в гл. 13. Там же указывается, как приближенно учитывается влияние насыщения на индуктивные сопротивления обмоток.

б) **Синхронные машины.** Формула для определения индуктивного сопротивления рассеяния x_σ обмотки статора составляется аналогично формулам для x_1 и x_2 и имеет следующий вид:

$$x_\sigma = 0{,}158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l'_\delta}{pq_1} \times (\lambda_п + \lambda_д + \lambda_л + \lambda_к),\ ом. \quad (7\text{-}57)$$

Коэффициент проводимости пазового рассеяния $\lambda_п$ определяется по одной из формул, приведенных в § 7-2, а, 1, в соответствии с выбранными размерами и формой паза и с учетом укорочения шага.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_д$ для явнополюсной синхронной машины в обычных случаях меньше $\lambda_{д1}$ для асинхронной машины, так как первая машина по сравнению со второй имеет больший зазор. Еще большее различие между $\lambda_д$ и $\lambda_{д1}$ получается в случае неявнополюсной синхрон-

ной машины, так как она имеет обычно большое число пазов на полюс и фазу q_1 при наиболее благоприятном шаге $\beta=\frac{y}{\tau}\approx\frac{5}{6}$, что приводит к значительному уменьшению $\sigma_д$ (см. табл. 7-2а).

При расчете x_σ явнополюсной синхронной машины $\lambda_д$ можно найти по (7-40); при этом для приближенного учета неравномерности за-

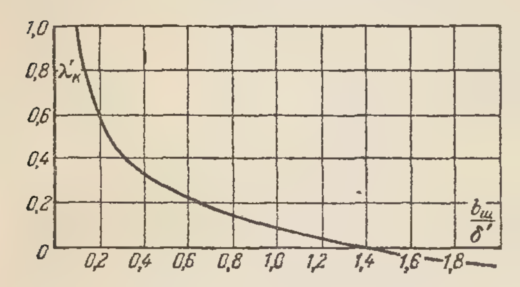


Рис. 7-17. К определению рассеяния между коронками зубцов (для синхронных машин).

зора полученное значение $\lambda_д$ следует умножить на коэффициент, равный 0,85—0,95 (снижается при $\alpha_p<0,7$ и $\delta_м/\delta\geqslant 1,5$). Для неявнополюсных машин в обычных случаях можно принять $\lambda_д=0$.

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки $\lambda_л$ можно определить по одной из формул, приведенных в § 7-2, а, 3, в соответствии с выбранным типом обмотки.

В формулу (7-57) для индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря синхронной машины вводится еще коэффициент проводимости рассеяния между коронками зубцов $\lambda_к$. Для асинхронных машин его значение принимается равным нулю. Для явнополюсных синхронных машин его можно определить по формуле из [Л. 55]:

$$\lambda_к=\left[\alpha_p\lambda'_к+(1-\alpha_p)\left(0,22+0,32\sqrt{\frac{b_z}{b_ш}}\right)\right]k'_\beta, \quad (7\text{-}58)$$

где $\alpha_p=b_p/\tau$; b_z — ширина коронки зубца; $b_ш$ — ширина открытия паза (равна ширине паза $b_п$ при открытых пазах); k'_β — по (7-28) или (7-29), $\lambda'_к$ — из кривой на рис. 7-17 (при $\delta'=k_\delta\delta$).

Кривая $\lambda'_к=f(b_ш/\delta')$ показывает, что при больших значениях отношения ширины открытия паза к зазору $\lambda'_к$ становится отрицательным. С физической стороны это означает, что составляющая коэффициента проводимости пазового рассеяния $h'_2/b_п$, например, в (7-23) при небольшом зазоре уменьшается, так как в этом случае магнитные линии «выпучиваются» в зазор, а не проходят в виде прямых линий поперек паза, как это принимается при определении $\lambda_п$.

Для синхронных машин $\lambda_к$ обычно имеет относительно малое значение.

Формулы для определения других индуктивных сопротивлений синхронной машины, соответствующих статическим и динамическим режимам ее работы, приводятся в гл. 14.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ
ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При работе электрической машины в ней возникают потери энергии. Они определяются при установившемся режиме ее работы. Поэтому можно рассматривать потери энергии в единицу времени (1 *сек*) и, следовательно, определять расчетным или опытным путем потери мощности.

Потери мощности необходимо найти не только для определения к. п. д. машины, но и для расчета превышений температуры ее отдельных частей.

Электрическая машина в ее обычном исполнении представляет

собой вращающийся электромагнитный преобразователь энергии. В ней возникают механические и электромагнитные потери.

Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках, щеток о коллектор или контактные кольца, вращающихся частей машины о газ (воздух или водород в крупных турбогенераторах и синхронных компенсаторах) и перемещение или циркуляцию охлаждающего газа. Последние потери иногда рассматриваются как собственно вентиляционные потери. В машинах с самовентиляцией при наличии вентиляторов они равны мощности, затрачиваемой на их вращение.

Потери на трение вращающихся частей о воздух и собственно вентиляционные потери обычно объединяются и рассматриваются как общие вентиляционные потери.

Электромагнитные потери состоят из электрических и магнитных; последние называются также потерями в стали или потерями на перемагничивание. Те и другие подразделяются на основные и добавочные.

Основные электрические потери возникают в обмотках и переходных контактах щеток при прохождении по ним основного рабочего тока. Электрические потери в параллельных обмотках возбуждения машин постоянного тока и обмотках возбуждения синхронных машин относятся к потерям на возбуждение.

Добавочные электрические потери вызываются главным образом полями рассеяния — пазовым, дифференциальным и лобовых частей обмоток.

Основные магнитные потери, или потери в стали от гистерезиса и вихревых токов, вызываются основным магнитным потоком и возникают в стальных участках магнитной цепи, где создается переменное магнитное поле.

Добавочные потери в стали вызываются пульсациями поля из-за зубчатости статора и ротора, полями, созданными высшими гармониками н. с. их обмоток, а также (в машинах постоянного тока) искажением поля вследствие поперечной реакции якоря.

Механические потери, основные потери в стали и добавочные из-за зубчатости статора и ротора возникают как при холостом ходе, так и при нагрузке машины. Их обычно называют потерями холостого хода, так как при опытном исследовании электрических машин они определяются по данным опыта холостого хода. Эти потери для большинства машин, работающих с постоянными напряжением на зажимах якоря и скоростью вращения, мало изменяются при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке.

Другие виды потерь возникают при нагрузке машины. В синхронной машине при опытном ее исследовании потери при нагрузке определяются по данным опыта короткого замыкания, поэтому их называют также потерями короткого замыкания. Они состоят из основных электрических потерь в обмотке статора и добавочных потерь при нагрузке.

8-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

а) **Потери в подшипниках.** *Потери в подшипниках скольжения* с кольцевой смазкой при удельном давлении на шейку вала (отнесенном к ее проекции на горизонтальную плоскость) $p_п < 30$ *кг/см²* и окружной скорости шейки вала $v_п = 0{,}5 \div 4$ *м/сек*

$$P_п = \frac{26}{\vartheta_м} d_п l_п v_п^{1,5} 10^{-3}, \text{ квт}, \quad (8\text{-}1)$$

где $d_п$ и $l_п$ — диаметр и длина шейки вала, *см*;
$\vartheta_м$ — температура масла, °С.

Формула (8-1) применима для подшипников обычного исполнения при правильно выбранном зазоре между вкладышем и шейкой вала и смазочном масле с надлежащими свойствами. В среднем можно принять $\vartheta_м = 50°$ С; тогда получим:

$$P_п = 0{,}52 d_п l_п v_п^{1,5} \cdot 10^{-3}, \text{ квт}. \quad (8\text{-}1а)$$

Для быстроходных машин большой мощности (8-1а) дает преувеличенное значение. Для таких ма-

шин потери в подшипниках можно определить по формуле

$$P_п = 0{,}1 l_п \sqrt{p_п d_п \left(1 + 4\frac{d_п}{l_п}\right)} \times$$
$$\times v_п^{1,5} \cdot 10^{-3}, \ квт. \qquad (8\text{-}1б)$$

Потери в подшипниках качения

$$P_п = 0{,}015 \frac{G_п}{d_ц} v_ц \cdot 10^{-3}, \ квт, \qquad (8\text{-}2)$$

где $G_п$ — нагрузка на подшипник, *кг*;
$d_ц$ — диаметр окружности по центрам шариков (или роликов), *см*;
$v_ц$ — окружная скорость, соответствующая диаметру $d_ц$, *м/сек*.

Потери в подпятнике гидрогенератора предварительно могут быть определены по формуле

$$P_п \approx A (G_п n)^{1,5} \cdot 10^{-6}, \ квт, \qquad (8\text{-}3)$$

где A — коэффициент, который можно взять из кривой на рис. 8-1

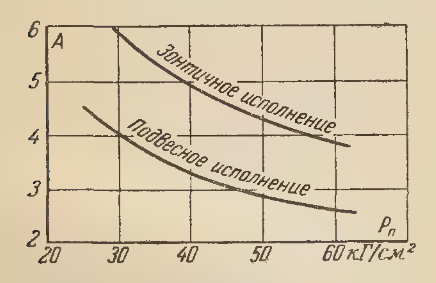


Рис. 8-1. К расчету потерь в подпятнике.

в зависимости от удельного давления на поверхность сегментов $p_п$ и исполнения гидрогенератора (обычно $p_п \approx 35 \div 45$ *кг/см²*); $G_п$ — общее давление на пяту, равное сумме веса вращающихся частей гидроагрегата и осевой составляющей давления воды на лопасти турбины, *т*.

Можно принять $G_п \approx (2{,}4 \div 3{,}2)\, G_г$, где $G_г$ — вес вращающихся частей гидрогенератора, *т* (высшие значения относятся к поворотнолопастным турбинам с коэффициентом угона $k_у \approx 2{,}5 \div 3$, низшие значения — к радиально-осевым турбинам с коэффициентом угона $k_у \approx 1{,}7 \div 1{,}8$).

Потери $P_п$ в гидрогенераторах зонтичного исполнения значительно больше, чем в гидрогенераторах подвесного исполнения, так как в первом случае сегменты подпятника располагаются на большем диаметре и здесь, следовательно, происходит трение при большей окружной скорости.

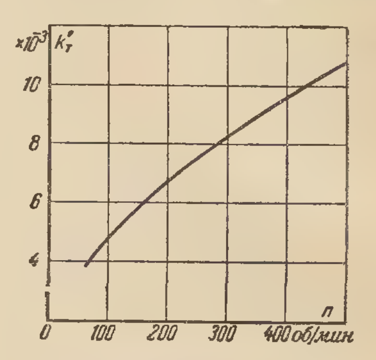


Рис. 8-2. К расчету потерь в направляющих подшипниках.

Более точно потери $P_п$ определяются после подробной разработки конструкции гидрогенератора, выбора размеров сегментов при известных весе вращающихся частей турбины и давлении воды на ее лопасти (сообщаются заводом — изготовителем турбины).

При определении к. п. д. гидрогенератора к нему обычно относится половина потерь $P_п$ (другая половина относится к турбине).

Потери в направляющих подшипниках вертикального гидрогенератора могут быть вычислены по формуле

$$P'_п \approx 9{,}81 k'_т T v_ц, \ квт, \qquad (8\text{-}4)$$

где $k'_т$ — коэффициент трения при температуре масла 40° С (рис. 8-2);
T — нагрузка на подшипник, *т*;
$v_ц$ — окружная скорость на цапфе подшипника, *м/сек*.

Нагрузка на подшипник складывается из центробежной силы $T_р$, возникающей из-за неуравновешенности ротора, и силы магнитных тяжений $T_δ$ из-за эксцентриситета ротора:

$$T = T_р + T_δ, \ т, \qquad (8\text{-}5)$$

где $T_р \approx (0{,}017 \div 0{,}020)\ G_р$ при весе ротора $G_р$, *т*; $T_\delta \approx 4{,}7\ l_1 D$, *т* при l_1 и D в метрах (последняя формула соответствует $B_\delta = 7\,200$ *гс*, $\alpha_р = 0{,}72$ и эксцентриситету $\varepsilon/\delta = 0{,}1$).

Потери в двух подшипниках двухполюсного турбогенератора

$$P_п = 255 \sqrt{\frac{G_р}{2} \cdot \frac{l_ц}{d_ц}} \times$$

$$\times\ d_ц^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} \cdot 10^{-4},\ квт, \quad (8\text{-}6)$$

где $G_р$ — вес ротора, *т*; $l_ц$ и $d_ц$ — длина и диаметр цапфы, *см*.

Предварительно можно принять:

$$G_р \approx (1{,}3 \div 1{,}5) \frac{\pi}{4} D'^2 l_2 \times$$

$$\times 7{,}85 \cdot 10^{-6},\ т; \quad (8\text{-}7)$$

$$d_ц l_ц \approx \frac{G_р \cdot 10^3}{2\,(12 \div 14)} \text{ и } l_ц = (1{,}0 \div 1{,}2)\, d_ц,$$

где D' и l_2 — диаметр и длина бочки ротора, *см*.

б) **Потери на трение щеток о коллектор и контактные кольца.** Рассматриваемые потери вычисляются по формуле

$$P_{тр(щ)} = 9{,}81 k_{тр} p_щ S_щ v_к \cdot 10^{-3},\ квт, \quad (8\text{-}8)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трения, равный для коллектора в среднем 0,25 и для контактных колец 0,15—0,17;

$p_щ$ — удельное давление щеток, равное 0,15—0,25 *кГ/см²*;

$S_щ$ — общая площадь скольжения всех щеток, *см²*;

$v_к$ — окружная скорость коллектора или контактных колец, *м/сек*.

в) **Потери на вентиляцию.** В машинах, работающих с самовентиляцией, общие вентиляционные потери

$$P_{вент} \approx 1{,}5 V v^2 \cdot 10^{-3},\ квт, \quad (8\text{-}9)$$

где V — количество воздуха, прогоняемое через машину, *м³/сек* (см. гл. 10);

v — окружная скорость вентиляционных крыльев по их внешнему диаметру (для явнополюсных синхронных машин — окружная скорость ротора), *м/сек*.

Так как V пропорционально v, то согласно (8-9) потери $P_{вент}$ возрастают пропорционально третьей степени скорости вращения машины. В случае необходимости можно по формулам гл. 10 отдельно рассчитать потери на перемещение воздуха.

Для турбогенератора потери на трение о газ и потери на циркуляцию газа (мощность на вращение вентиляторов) рассчитываются раздельно.

Потери от трения воздуха о бочку гладкого ротора и внутреннюю поверхность статора

$$P'_{тр} = 57{,}3 D'^4 l_2 \left(\frac{f}{50}\right)^3 \cdot 10^{-10},\ квт; \quad (8\text{-}10)$$

потери от трения воздуха о торцевые поверхности канавок рифления

$$P_р = 2{,}7 n_р \left[D'^5 - (D' - 2h_р)^5\right] \times$$

$$\times \left(\frac{f}{50}\right)^3 \cdot 10^{-10},\ квт; \quad (8\text{-}11)$$

потери от трения воздуха о поверхности двух кольцевых бандажей

$$P_б = 57{,}3 D_{к1}^4 l_к \left(\frac{f}{50}\right)^3 \cdot 10^{-10},\ квт, \quad (8\text{-}12)$$

где D' и l_2 — диаметр и длина бочки ротора, *см*;

$n_р$ — число канавок рифления ($\sim 0{,}9 l_2/1{,}2$);

$h_р$ — глубина канавки рифления ($\sim 0{,}5$—$0{,}6$ *см*);

$D_к$ и $l_к$ — внешний диаметр и длина бандажа, *см*.

Общие потери от трения вращающихся частей ротора о воздух

$$P_{тр} = P'_{тр} + P_р + P_б,\ квт. \quad (8\text{-}13)$$

Те же потери при водородном охлаждении

$$P_{тр\,Н} = \frac{1}{10} P_{тр} \frac{p_Н}{p_{Н_0}},\ квт; \quad (8\text{-}14)$$

здесь принято, что плотность газа, содержащего 95—97% чистого водорода, при его абсолютном давлении $p_{Н_0} = 1 \div 1{,}05$ *ат* в 10 раз меньше плотности воздуха при том же давлении; при давлении газа $p_Н$ *ат* плотность его, а следовательно, и потери возрастают.

Потери на вентиляцию (на вращение вентиляторов)

$$P'_{\text{вент}} = \frac{VH}{102\eta_э}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}15)$$

где V — количество газа, циркулирующего в машине, $м^3/сек$;

H — напор, создаваемый вентилятором, *мм вод. ст.* [обычно $H \approx 200 \div 350$ при воздушном охлаждении; $H \approx \approx 1/10 \quad (450 \div 650)\ p_п/p_{н_0}$ при водородном охлаждении];

$\eta_э$ — к.п.д. вентилятора, равный 0,3 для центробежных вентиляторов и 0,5 для осевых.

При определении V для турбогенераторов типов Т, ТВ и ТВФ (см. гл. 14) нужно взять общие потери в машине, за исключением потерь в подшипниках, а для турбогенераторов типа ТВВ, кроме того, нужно из общих потерь вычесть еще электрические потери (основные и добавочные) в обмотке статора, так как эти потери отводятся водой, циркулирующей в обмотке.

г) **Общие потери в подшипниках и вентиляционные.** Указанные потери определяются по эмпирическим формулам или кривым, полученным на основе данных испытаний машин нормального исполнения.

1. *Машины постоянного тока.* Для машин большой мощности с диаметром якоря $D \geqslant 60$ *см* без вентилятора на валу при определении механических потерь (за исключением потерь на трение щеток о коллектор) применяется следующая формула:

$$P'_{\text{мех}} \approx 1{,}1 \left(\frac{v}{10}\right)^{1{,}6} P_н \cdot 10^{-3}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}16)$$

где v — окружная скорость якоря, *м/сек*;

$P_н$ — номинальная мощность, *квт*.

Для машин с $D < 60$ *см* при подшипниках скольжения

$$P'_{\text{мех}} \approx \left(1{,}75 v^2 V + 5 G v_п \sqrt{\frac{n_н}{p_п}}\right) \cdot 10^{-3}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}17)$$

где $n_н$ — номинальная скорость вращения, *об/мин*;

$v_п$ — окружная скорость шейки вала, *м/сек*;

G — вес вращающихся частей, *т*;

$p_п = G_п/d_п l_п$ — удельное давление на рабочую проекцию вала в подшипнике, $кГ/см^2$, при нагрузке на подшипник $G_п$, *кГ*.

Для средних и малых машин с подшипниками качения и вентилятором на валу механические потери $P'_{\text{мех}}$ можно определить по кривым на рис. 8-3.

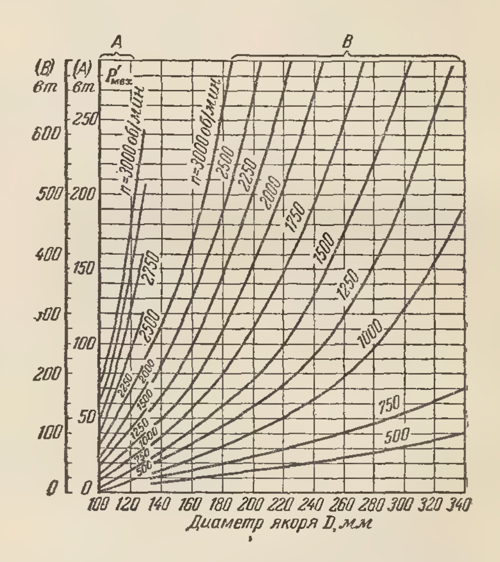


Рис. 8-3. Механические потери (в подшипниках качения и вентиляционные) средних и малых машин постоянного тока.

2. *Асинхронные машины.* Для двигателей с радиальной вентиляцией:

с радиальными каналами

$$P'_{\text{мех}} \approx 1{,}2 \cdot 2p \left(\frac{\tau}{10}\right)^3 \times (n_в + 11) \cdot 10^{-3}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}18)$$

где τ — полюсное деление, *см*;

$n_в$ — число радиальных каналов;

без радиальных каналов с лопатками на торцах ротора

$$P'_{мех} \approx k_т \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \times \left(\frac{D}{10}\right)^3 \cdot 10^{-3}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}19)$$

где D — внутренний диаметр статора, *см*; $k_т=6$ при $D_a>25$ *см*; $k_т=5$ при $D_a \leqslant 25$ *см* для $2p=2$; $k_т=7$ при $D_a>25$ *см*; $k_т=6$ при $D_a \leqslant 25$ *см* для $2p>2$ (D_a — внешний диаметр пакета статора).

Для двигателей с аксиальной вентиляцией

$$P'_{мех} \approx 0{,}65 \left(\frac{n}{1\,000}\right)^2 \times \left(\frac{D_a}{10}\right)^4 \cdot 10^{-3}, \text{ квт}. \qquad (8\text{-}20)$$

Для двигателей с внешним обдувом

$$P'_{мех} \approx k_т \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \times \left(\frac{D_a}{10}\right)^4 \cdot 10^{-3}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}21)$$

где $k_т=1{,}3\left(1-\frac{D_a}{100}\right)$ при $2p=2$; $k_т=1$ при $2p>2$ [формула (8-21) применима при $10 \leqslant D_a \leqslant 50$]. Формулы (8-20) и (8-21) относятся к машинам с центробежными вентиляторами. Если применяются осевые вентиляторы, то полученное по формулам значение $P'_{мех}$ следует уменьшить в 2 раза.

3. *Синхронные явнополюсные машины.* Потери в этих машинах вычисляются по формуле

$$P'_{мех} \approx 0{,}8 \cdot 2p \left(\frac{v}{40}\right)^3 \times \sqrt{\frac{l_1}{19}}, \text{ квт}, \qquad (8\text{-}22)$$

где v — окружная скорость ротора, *м/сек* (при $f=50$ *гц* $v_{(м/сек)} \approx \tau_{(см)}$);
l_1 — полная длина статора, *см*.

8-3. ОСНОВНЫЕ ПОТЕРИ В СТАЛИ

Основные потери в стали вызываются основным потоком машины. Они возникают в зубцах и ярме якоря машин постоянного тока и в зубцах и ярме статора асинхронных и синхронных машин. Потерями в стали ротора асинхронных двигателей от основного потока можно пренебречь.

Рассматриваемые потери состоят из потерь от гистерезиса и вихревых токов. Потери от гистерезиса можно считать пропорциональными первой степени частоты изменения индукции (частоты перемагничивания) f и квадрату максимального значения индукции B. Они практически не зависят от толщины листа. Потери от вихревых токов при равномерном распределении индукции по сечению листа пропорциональны $(\Delta f B)^2$, где Δ — толщина листа; кроме того, они зависят от формы кривой основного поля.

Можно принять, что при частотах перемагничивания стали зубцов и ярма, вызванного изменением основного поля, индукция по сечению листов распределяется равномерно.

Перемагничивание стали может быть переменным, когда напряженность поля изменяется по величине (например, в трансформаторах и зубцах якоря или статора), или вращательным, когда оно возникает вследствие вращения вектора напряженности поля (в ярме якоря или статора). Потери в стали в том и другом случаях различны: потери при вращательном перемагничивании больше, чем при переменном. Учесть это различие очень трудно. К тому же в действительности в ярме якоря или статора получается смешанное перемагничивание — частично вращательное, частично переменное.

На потери в стали в большой степени влияют всякого рода дефекты, возникающие при штамповке пазов и опиловке их стенок в собранном пакете («наклепы» по краям зубцов, повышающие потери от гистерезиса; заусенцы, замыкающие листы, что приводит к увеличению потерь от вихревых токов), шлифовке поверхностей статора и ротора, стяжке пакетов (она не должна быть чрезмерной), забивании пазовых клиньев.

Вследствие указанных причин для расчета потерь в стали обычно используются несколько упрощенные формулы, в которые входят опытные коэффициенты.

а) **Потери в стали ярма статора и ротора.** *Потери в стали ярма ротора (якоря) машины постоянного тока* при толщине листа $\Delta = 0{,}5$ *мм*

$$P_{\text{с.р}} = c_{\text{р}} \left(\frac{B_{\text{р}}}{10\,000}\right)^2 G_{\text{р}} \cdot 10^{-3},\ \textit{квт}. \quad (8\text{-}23)$$

Коэффициент $c_{\text{р}}$ зависит от частоты перемагничивания $f = pn/60$, марки стали и учитывает дефекты при обработке; его значение можно найти по эмпирическим формулам:

$$c_{\text{р}} = \frac{f(f+70)}{500} \text{ для марок}$$

стали Э11, Э12, Э21;

$$c_{\text{р}} = \frac{f(f+200)}{1700} \text{ для марки стали Э31.}$$

Индукция $B_{\text{р}}$ *гс* определяется по магнитному потоку и сечению ярма; вес ярма $G_{\text{р}}$ *кг* — по геометрическим размерам ярма.

Потери в стали ярма статора асинхронной или синхронной машины

$$P_{\text{с.с}} = k_{\text{д}}\, p_{\text{с.с}} G_{\text{с}} \cdot 10^{-3},\ \textit{квт}. \quad (8\text{-}24)$$

Здесь: $k_{\text{д}} \approx 1{,}6$ при $P_{\text{н}} \leqslant 250$ *квт*; $k_{\text{д}} \approx 1{,}3$ при $P_{\text{н}} > 250$ *квт* (учитывает дефекты при обработке и неравномерность распределения индукции); $p_{\text{с.с}} = p_{10/50} \left(\frac{B_{\text{с}}}{10\,000}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{\alpha}$,

где $p_{10/50}$ — удельные потери в стали (см. табл. 2-2); $B_{\text{с}}$ — индукция в ярме статора, *гс*; $\alpha = 1{,}3 \div 1{,}5$ (обычно $\alpha \approx 1{,}3$); $G_{\text{с}}$ — вес ярма статора, *кг*; значение $p_{\text{с.с}}$ при данной индукции $B_{\text{с}}$ и частоте $f = 50$ *гц* можно взять непосредственно из таблиц приложения III.

б) **Потери в стали зубцов.** *Потери в стали зубцов ротора (якоря) машины постоянного тока*

$$P_{\text{с}z} = c_z \left(\frac{B_{z\,\text{ср}}}{10\,000}\right)^2 G_z \cdot 10^{-3},\ \textit{квт}. \quad (8\text{-}25)$$

Значение коэффициента c_z, учитывающего дефекты при обработке и несинусоидальность кривой поля в зазоре, вычисляется по формуле

$$c_z = \frac{f(f+30)}{350} \text{ для марок стали}$$

Э11, Э12, Э21 или

$$c_z = \frac{f(f+100)}{1300} \text{ для марок стали Э31;}$$

$B_{z\text{ср}}$ — индукция в среднем сечении зубца, *гс*; G_z — вес зубца, *кг*.

Потери в стали зубцов статора асинхронной или синхронной машины

$$P_{\text{с}z} = k_{\text{д}}\, p_{\text{с}z} G_z \cdot 10^{-3},\ \textit{квт}, \quad (8\text{-}26)$$

где $k_{\text{д}} \approx 1{,}8$ при $P_{\text{н}} \leqslant 250$ *квт*; $k_{\text{д}} \approx 1{,}7$ при $P_{\text{н}} > 250$ *квт*;

$$p_{\text{с}z} = p_{10/50} \left(\frac{B_{z\,\text{ср}}}{10\,000}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1{,}3},\ \textit{вт/кг};$$

G_z — вес зубцов, *кг*.

8-4. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ ХОЛОСТОГО ХОДА

В машинах постоянного тока эти потери состоят из поверхностных потерь в полюсных наконечниках, потерь от вихревых токов в пазовых частях проводников обмотки якоря, вызванных поперечным полем в пазах, и потерь в проволочных бандажах на якоре, если они имеются.

Обычно учитываются только поверхностные потери в полюсных наконечниках, так как другие потери невелики

Потери, обусловленные наличием поперечного поля в пазах, зависят от высоты проводников якоря и индукции в зубцах. Поперечное поле в пазах при холостом ходе создается обмоткой возбуждения; его напряженность получается наибольшей в пазах под краями полюсных наконечников. Для снижения рассматриваемых потерь, с которыми приходится считаться в случае крупных быстроходных машин, уменьшают высоту проводника или делают его состоящим из двух частей и переплетают эти части в середине проводника.

Потерями в проволочных бандажах, если их ширина не превышает 2,5 *см* и они занимают не больше

20—25% длины якоря, обычно пренебрегают.

Добавочные потери холостого хода *в асинхронных машинах* в основном состоят из поверхностных и пульсационных потерь в зубцах статора и ротора, обусловленных открытиями их пазов.

При открытых пазах статора и неправильно выбранном отношении чисел пазов статора и короткозамкнутого ротора могут быть заметными потери от токов, наведенных в клетке ротора зубцовыми полями статора [Л. 59]. Их обычно не учитывают.

В синхронных явнополюсных машинах добавочные потери холостого хода состоят в основном из поверхностных потерь в полюсных наконечниках.

В турбогенераторах добавочные потери холостого хода состоят из поверхностных и пульсационных потерь, а также из потерь, обусловленных высшими гармониками кривой поля [Л. 114].

а) **Поверхностные потери.** *В машинах постоянного тока и явнополюсных синхронных машинах* поверхностные потери в полюсных наконечниках вызываются колебаниями поля в их поверхностном слое из-за наличия пазов на якоре (статоре). Эти колебания поля происходят с большой частотой $f_z = Zn/60$, где Z — число пазов якоря (статора). Поэтому глубина проникновения их мала и соответственно наводимые ими вихревые токи возникают только в тонком поверхностном слое полюсных наконечников.

При высокой частоте колебаний поля увеличивается реакция вихревых токов и вызванные ими потери оказываются пропорциональными $f_z^{1,5}$, а не f_z^2. Они зависят от амплитуды колебаний индукции B_0, которая возрастает с уменьшением зазора δ и увеличением открытия паза $b_ш$. Кроме того, они зависят от толщины листов, из которых собраны полюсы, проницаемости стали, ее удельного сопротивления и дефектов при обработке.

Амплитуда колебаний индукции

$$B_0 = \beta_0 k_\delta B_\delta, \ гс, \qquad (8\text{-}27)$$

где β_0 — коэффициент по кривой на рис. 8-4.

Среднее значение удельных поверхностных потерь, отнесенных к 1 *м*² поверхности полюсного наконечника,

$$p_{пов} = K_0 \left(\frac{Zn}{10\,000}\right)^{1,5} \times \left(\frac{B_0 t}{1000}\right)^2, \ вт/м^2, \qquad (8\text{-}28)$$

где K_0 — коэффициент из табл. 8-1; B_0 — по (8-27); t — зубцовое деление якоря (статора), *см*.

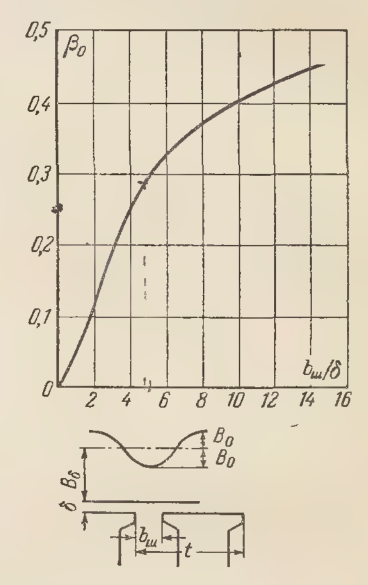


Рис. 8-4. К определению амплитуды колебаний индукции на поверхности статора или ротора.

Поверхностные потери всех полюсных наконечников

$$P_{пов} = 2p\,\tau\alpha_р l_р p_{пов} \cdot 10^{-7}, \ квт, \qquad (8\text{-}29)$$

где $l_р$ — длина полюсного наконечника ($l_р \approx l_1$), *см*;

τ — полюсное деление, *см*.

Для синхронных машин при $\delta_м/\delta = 1,5 \div 2$ полученное по (8-29) значение надо умножить на 0,6—0,5.

В асинхронных машинах поверхностные потери в зубцах статора и ротора возникают вследствие колебаний поля, вызванных открытиями пазов, т. е. вследствие изменяющегося распределения индукции в поверхностном слое зубцов статора и ротора.

Таблица 8-1

Значения коэффициента K_0

Марка стали	Толщина листа, *мм*	Способ обработки		
		Без обработки	Шлифовка	Обточка
Э11, Э12	1	4,5	5,0	5,5
Э11, Э12, Э21	0,5	1,8	2,0	2,5
Э31	0,5	1,4	1,7	2,0
Конструкционная сталь	0,5—0,55	2,0	2,5	2,8
То же	1	4,5	5,0	5,5
То же	2	7,2	8,0	8,6
—	Сплошная	—	—	23,3

Примечание. Поверхность полюсных наконечников не обрабатывается. Внутренняя поверхность статора асинхронных двигателей мощностью до 100 (160) *квт* не обрабатывается (пакеты статора собираются на цилиндрической оправке); при большей мощности она обычно шлифуется. Поверхность ротора шлифуется или (реже) обтачивается.

Принимая синусоидальным распределение поля в зазоре асинхронной машины, среднее значение удельных потерь, отнесенных к 1 $м^2$ поверхности статора (ротора), можно определить по формуле

$$p_{пов.с(р)} = 0{,}5 K_0 \left(\frac{Z_{р(с)}\, n}{10\,000}\right)^{1,5} \times \left(\frac{B_0 t_{р\ (с)}}{1000}\right)^2, \ вт/м^2, \quad (8\text{-}30)$$

где $Z_{р(с)}$ — число зубцов ротора (статора);

n — скорость вращения ротора, *об/мин* (можно принять $n = n_1$);

B_0 — по (8-27);

$t_{р(с)}$ — зубцовое деление ротора (статора), *см*;

K_0 — из табл. 8-1.

Полные потери на всей поверхности зубцов статора (ротора)

$$P_{пов.с\ (р)} = 2p\tau \frac{t_{с(р)} - b_{ш.с(р)}}{t_{с(р)}} \times l p_{пов.с(р)} \cdot 10^{-7}, \ квт \quad (8\text{-}31)$$

(здесь все размеры в сантиметрах).

В асинхронных машинах поверхностные потери могут быть значительными, так как здесь при малом воздушном зазоре δ может быть большим отношение $b_ш/\delta$, особенно при открытых пазах. Поверхностные потери имеют место главным образом в зубцах ротора. В зубцах статора они значительно меньше, так как пазы ротора, как правило, делаются полузакрытыми с небольшой шириной открытия паза $b_ш$.

б) **Пульсационные потери.** В машинах с пазами на статоре и роторе (например, в асинхронных машинах) индукция в зубцах изменяется вследствие изменения взаимного расположения зубцов статора и ротора. При этом создаются колебания потоков в зубцах, вызывающие добавочные потери, называемые пульсационными. Они возникают во всем объеме зубцов.

Практически можно считать, что пульсационные потери, так же как и поверхностные, состоят из потерь от вихревых токов, так как потери от гистерезиса при высокой частоте перемагничивания относительно малы.

Пульсационные потери приближенно могут быть определены по формуле

$$P_{пул.с\ (р)} \approx 0{,}11 \left(\frac{Z_{р(с)}\, n}{10\,000} \times \frac{B_{пул.с(р)}}{1000}\right)^2 G_{zс(р)} \cdot 10^{-3}, \ квт. \quad (8\text{-}32)$$

Здесь индексы вне скобок относятся к зубцам статора, индексы в скобках — к зубцам ротора; коэффициент 0,11 относится к маркам стали Э11, Э12, Э21; для марки стали Э31 можно взять коэффициент 0,09.

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубца

$$B_{пул.с(р)} \approx \frac{\gamma_{р(с)}\, \delta}{2 t_{с(р)}} B_{z\ ср.с(р)}, \ гс, \quad (8\text{-}33)$$

где $\gamma_{р(с)}$ — коэффициент:

$$\gamma_{р(с)} = \frac{\left(\frac{b_{ш.р(с)}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{ш.р(с)}}{\delta}}; \quad (8\text{-}34)$$

$B_{zср.с(р)}$ — средняя действительная индукция в зубцах статора (или ротора), *гс*.

При открытых пазах для определения $\gamma_{р(с)}$ следует взять вместо дей-

ствительной расчетную ширину паза

$$b'_{ш.р(с)} \approx \frac{b_{ш.р(с)}}{3} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{0,5\, t_{р\,(с)}}{t_{р(с)} - b_{ш.р\,(с)} + \varkappa\delta}\right). \quad (8\text{-}35)$$

Рис. 8-5. К определению расчетной ширины открытого паза.

Коэффициент $\varkappa$ в зависимости от $b_ш/\delta = b_п/\delta$ можно взять из кривой на рис. 8-5.

Формула (8-32) является приближенной. Она основана на определении потоков в зубцах при двух крайних наиболее неблагоприятных взаимных положениях их. Если число зубцов ротора Z_2 приближается к числу зубцов статора Z_1, то пульсационные потери снижаются.

в) **Полные потери в стали холостого хода.** В машинах постоянного тока

$$P_с = P_{с.р} + P_{сz} + P_{пов},\ квт. \quad (8\text{-}36)$$

В асинхронных машинах

$$P_с = P_{с.с} + P_{сz} + P_{с.д},\ квт, \quad (8\text{-}37)$$

где

$$P_{с.д} = P_{пов.с} + P_{пов.р} + $$
$$+ P_{пул.с} + P_{пул.р},\ квт. \quad (8\text{-}38)$$

В синхронных машинах

$$P_с = P_{с.с} + P_{сz} + P_{пов},\ квт. \quad (8\text{-}39)$$

8-5. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

а) **Потери в обмотках.** Основные электрические потери в обмотках определяются по формуле $P_э = \Sigma I_x^2 r_x$, где I_x — ток в обмотке x; r_x — сопротивление этой обмотки при постоянном токе, приведенное к расчетной рабочей температуре (см. § 7-1).

Для машин постоянного тока

$$P_э = I_a^2 \Sigma r_x \cdot 10^{-3},\ квт, \quad (8\text{-}40)$$

где I_a — ток в обмотке якоря и обмотках, последовательно с нею соединенных; Σr_x — сумма сопротивлений всех обмоток внутренней цепи якоря, по которым протекает ток I_a.

Для обмоток статора асинхронных и синхронных машин

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3},\ квт. \quad (8\text{-}41)$$

Для обмоток ротора асинхронных машин

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 \cdot 10^{-3} =$$
$$= m_1 I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3},\ квт. \quad (8\text{-}42)$$

б) **Потери в переходных контактах щеток.** Для машин постоянного тока

$$P_{э(щ)} = 2\Delta U_щ I_a \cdot 10^{-3},\ квт, \quad (8\text{-}43)$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения в переходных контактах щеток одной полярности, *в*.

Для асинхронных машин с контактными кольцами, не имеющих приспособления для подъема щеток и замыкания колец накоротко,

$$P_{э(щ)} = m_2 \Delta U_щ I_{2(к)} \cdot 10^{-3},\ квт, \quad (8\text{-}44)$$

где $I_{2(к)}$ — ток кольца, *а* (при соединении обмотки ротора звездой $I_{2(к)} = I_2$; при соединении ее треугольником и $m_2 = 3$ $I_{2(к)} = \sqrt{3}\, I_2$).

Согласно ГОСТ 11828-66 можно принять:

$\Delta U_щ = 1$ *в* для угольных и графитных щеток;

$\Delta U_щ = 0,3$ *в* для металлоугольных и металлографитных щеток.

8-6. ПОТЕРИ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ

Потери в обмотках возбуждения, последовательно соединенных с якорем, относятся к основным электрическим потерям во внутренней цепи якоря.

При определении к.п.д. машины постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением по-

тери на возбуждение принимаются равными:

$$P_в=UI_в\cdot 10^{-3},\ квт, \qquad (8\text{-}45)$$

где $I_в$ — ток в параллельной обмотке возбуждения;

U — напряжение на зажимах цепи возбуждения (обычно U равно напряжению машины).

В формуле (8-45) учитываются потери не только в обмотке возбуждения, но и в регулировочных реостатах, последовательно с нею соединенных.

При независимом возбуждении потери на возбуждение равны:

$$P_в=I_в^2 r_в\cdot 10^{-3},\ квт, \qquad (8\text{-}46)$$

где $I_в$ — ток в обмотке возбуждения; $r_в$ — сопротивление ее, приведенное к расчетной рабочей температуре.

Для синхронных машин при питании их обмотки возбуждения от постороннего источника (например, от возбудительного агрегата) потери на возбуждение можно вычислить по (8-46). К ним еще прибавляются электрические потери в переходных контактах щеток, составляющие обычно незначительную величину.

Если синхронная машина имеет возбудитель, приводимый от ее вала, то потери на возбуждение должны вычисляться с учетом потерь в возбудителе:

$$P_в=\frac{I_в^2 r_в+2\Delta U_щ I_в}{\eta_в}\cdot 10^{-3},\ квт, \qquad (8\text{-}47)$$

где к.п.д. возбудителя $\eta_в\approx 0{,}75\div 0{,}90$ (должен быть взят без его механических потерь, которые относятся к механическим потерям синхронной машины).

8-7. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ ПРИ НАГРУЗКЕ

Добавочные потери при нагрузке, возникающие в обмотках якоря и стали, могут быть определены только с некоторым приближением к их истинным значениям. Существующие методы их определения как при испытании, так и при расчете машин сложны и требуют дальнейших уточнений.

Согласно ГОСТ 11828-66 [Л. 61] добавочные потери всех электрических машин (кроме синхронных машин мощностью свыше 100 *ква*) при их испытании учитываются приближенно в процентах полезной мощности для генераторов и подводимой мощности для двигателей:

Для некомпенсированных машин постоянного тока	1
Для компенсированных машин постоянного тока	0,5
Для асинхронных машин	0,5
Для синхронных машин мощностью до 100 *ква* включительно	0,5
Для коллекторных машин переменного тока	1

Приведенные значения добавочных потерь используются и при расчете машин. Для упрощения расчета можно для явнополюсных синхронных машин нормального исполнения мощностью до 1 000 *ква* принять добавочные потери приближенно равными 0,5—0,4% $P_{1н}$.

Значения добавочных потерь указаны для номинальной мощности машин. При мощности, отличающейся от номинальной, они должны быть пересчитаны пропорционально квадрату тока якоря для всех видов машин.

а) **Машины постоянного тока.** Добавочные электрические потери в обмотке якоря обусловлены вихревыми токами, которые наводятся в ее проводниках пазовым полем рассеяния. В этих проводниках протекает переменный ток, изменяющийся с частотой $f=pn/60$. Кривая его изменения во времени при прямолинейной коммутации будет трапецеидальной, близкой к прямоугольной, так как период коммутации мал по сравнению с основным периодом изменения тока.

Кривую тока можно разложить на гармоники и отдельно рассматривать действие каждой из них, что позволяет на основе уравнений электродинамики при некоторых допущениях составить расчетные формулы для определения добавочных потерь в обмотке якоря. При этом определяется коэффициент k_f, равный отношению полных электрических потерь к основным электрическим потерям в пазовых частях обмотки якоря. Коэффициент k_f на-

зывается коэффициентом Фильда или коэффициентом добавочных потерь и вычисляется по формуле [Л. 88]

$$k_f \approx 1 + \frac{0{,}76\, u_в^2 \xi^2}{2+\nu}, \qquad (8\text{-}48)$$

где $u_в$ — число эффективных проводников по высоте паза (обычно $u_в = 2$); ξ и ν определяются по приведенным ниже формулам.

Приведенная высота эффективного проводника

$$\xi = \frac{n_{эл} b}{10} \sqrt{\frac{f}{50} \cdot \frac{u_п a}{b_п} \cdot \frac{\gamma}{50}}, \qquad (8\text{-}49)$$

где $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном по высоте паза;

b — размер элементарного проводника по высоте паза, *мм*;

$u_п$ — число секционных сторон по ширине паза;

a — размер элементарного проводника по ширине паза, *мм*;

$b_п$ — ширина паза, *мм*;

γ — удельная проводимость меди (см. табл. 7-1).

Коэффициент, учитывающий влияние периода коммутации на k_f,

$$\nu = \frac{31\, p}{\xi^2} \cdot \frac{u_п + \lambda - 1}{K}, \qquad (8\text{-}50)$$

где $\lambda = b_щ / t_к$ (отношению ширины щетки к коллекторному делению);

K — число коллекторных пластин.

При секциях с паяной головкой на стороне, противоположной коллектору,

$$k'_f \approx 1 + \frac{k_f - 1}{n_{эл}^2} + \frac{n_{эл}^2 - 1}{n_{эл}^2} (k_f - 1) \frac{l_\delta}{l_1 + l_л}. \qquad (8\text{-}48а)$$

При секциях с гнутой головкой

$$k'_f \approx 1 + \frac{k_f - 1}{n_{эл}^2} + \frac{k_f - 1}{5} \cdot \frac{n_{эл}^2 - 1}{n_{эл}^2} \cdot \frac{l_\delta}{l_1 + l_л}. \qquad (8\text{-}48б)$$

Следовательно, добавочные электрические потери в обмотке якоря равны:

$$P_{э.доб} = I_a^2 r_a (k'_f - 1) \times \frac{l_\delta}{l_1 + l_л} \cdot 10^{-3}, \textit{ квт} \qquad (8\text{-}51)$$

($k'_f = k_f$ при $n_{эл} = 1$).

Добавочные потери в стали при нагрузке машины без компенсационной обмотки обусловлены главным образом искажением поля из-за поперечной реакции якоря. Искажение поля приводит к повышению максимальной индукции в зазоре и появлению более резко выраженных гармоник в кривой поля, что вызывает увеличение потерь в зубцах якоря от гистерезиса и вихревых токов. Точно оценить это увеличение потерь едва ли возможно.

В машинах с компенсационной обмоткой добавочными потерями в стали при нагрузке можно пренебречь.

Кроме указанных добавочных потерь, при нагрузке возникают еще потери в проволочных бандажах на лобовых частях обмотки якоря, в стальных обмоткодержателях, коллекторных пластинах, вызванные полем токов щеток и пр. При расчете они обычно не учитываются.

б) **Асинхронные машины.** Добавочные электрические потери в обмотке статора больших асинхронных машин вызываются пазовым полем рассеяния. Они рассматриваются применительно к синхронным машинам в § 8-7, в.

Добавочные потери в стали при нагрузке асинхронной машины возникают главным образом в ее зубцах. Они вызваны ступенчатостью кривых н. с. обмоток статора и ротора. При этом получаются колебания поля с частотой f_z, амплитуда которых зависит от отношения $b_ш/\delta$ и полных токов в пазах. Вследствие колебаний поля возникают поверхностные и пульсационные потери в зубцах ротора и статора, пропорциональные квадрату тока [Л. 14].

В короткозамкнутых асинхронных двигателях те же колебания поля служат причиной возникновения токов в беличьей клетке. Поте-

ри от них достигают заметной величины, особенно в современных двигателях с литой алюминиевой клеткой на роторе. Здесь возникают поперечные токи по стали от стержня к стержню, причем при скошенных пазах они возрастают. Общие добавочные потери при нагрузке в этом случае, как показывает опыт, достигают 1—2% (иногда больше 2%) подводимой мощности при номинальной нагрузке [Л. 59]. Точный расчет их встречает большие затруднения из-за неопределенности сопротивлений для указанных поперечных токов.

При определении к.п.д. асинхронных двигателей, как указывалось, добавочные потери можно принять равными 0,5% $P_{1н}$. При расчете нагрева короткозамкнутых двигателей с литой алюминиевой обмоткой на роторе рекомендуется взять их равными 1—1,5% и считать, что эти потери в основном возникают в роторе.

в) **Синхронные машины.** *Добавочные электрические потери в обмотке статора* синхронных машин рассчитываются также с использованием коэффициента Фильда.

Сначала определяется коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке, имеющей транспонированные стержни на протяжении ее пазовых частей (см. рис. 14-14):

$$k_s = 0{,}107\, m^2 a^4 \left(\frac{k_ш b}{b_п}\right)^2 \times \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot 10^{-4}, \quad (8\text{-}52)$$

где m — число элементарных проводников по высоте стержня;

a — размер элементарного проводника по высоте паза, *мм*;

$k_ш$ — число элементарных проводников по ширине паза;

b — размер элементарного проводника по ширине паза, *мм*;

$b_п$ — ширина паза, *мм*.

Коэффициент k_s учитывает потери от вихревых токов, наведенных пазовым полем рассеяния в элементарных проводниках, и соответствует среднему значению этих потерь, неравномерно распределенных по высоте паза.

Формула (8-52) применяется для однослойной стержневой обмотки. Если в пазу $u_{п1}$ стержней, в каждом из которых m элементарных проводников по высоте, то получим:

$$k_s = 0{,}107\,(u_{п1}\, m)^2 a^4 \left(\frac{k_ш b}{b_п}\right)^2 \times \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot 10^{-4}. \quad (8\text{-}53)$$

В обычных случаях принимается, что потери от вихревых токов в элементарных проводниках возникают только в пазовых частях обмотки. Поэтому при определении этих потерь нужно основные электрические потери умножить на k_s и еще на коэффициент, равный:

$$\varepsilon = \frac{l_\delta}{l_1 + l_л}. \quad (8\text{-}54)$$

В современных крупных машинах при $A > 700$ *а/см* возникают также заметные добавочные потери в лобовых частях обмотки. Для их приближенного учета можно принять $\varepsilon \approx 1$.

В катушечных обмотках, эффективные проводники которых состоят из $n_{эл}$ элементарных проводников по высоте паза, имеем еще потери от циркуляционных токов. Последние возникают из-за различия э.д.с., наведенных пазовым полем рассеяния в элементарных проводниках. Потери от циркуляционных токов учитываются коэффициентом

$$k_c = \frac{0{,}019}{u_в^2}\, \varepsilon^2 \left(\frac{k_ш b}{b_п}\right)^2 \times (u_в\, n_{эл}\, a)^4 \cdot 10^{-4}, \quad (8\text{-}55)$$

где $u_в$ — число эффективных проводников по высоте паза.

Общий коэффициент Фильда

$$k_f = 1 + k_s \varepsilon + \zeta k_c, \quad (8\text{-}56)$$

где ζ — коэффициент, учитывающий число витков катушки $w_к$ и шаг обмотки.

Для плетеных (транспонированных) стержней $\zeta = 0$; для катушек без транспозиции в лобовых частях $\zeta = 1$; для катушек с транспозицией

при $w_к > 5$ можно принять среднее значение ζ:

$$\zeta = 0{,}8 - 4\frac{\beta}{w_к}, \qquad (8\text{-}57)$$

где β — шаг обмотки в долях τ.

При $w_к \leqslant 5$ значение ζ можно взять из табл. 8-2.

Таблица 8-2

Значения коэффициента ζ

Число витков в катушке	$\beta = 0{,}8$	$\beta = 0{,}85$	$\beta = 0{,}9$
5	0,18	0,16	0,13
4	0,13	0,10	0,08
3	0,11	0,08	0,11
2	0,08	0,08	0,08

Для стержневых обмоток, стержни которых состоят из полых и сплошных проводников (см. рис. 14-17),

$$k_s \approx 0{,}107\left(\frac{f}{50}\right)^2\left(\frac{b_м}{b_п}\right)^2 \times$$

$$\times (n_1 a_1 + n_2 a_2)^2 \left[a_1^2 \frac{n_1 a_1}{h_м}\left(1 - \frac{a_к b_к}{a_1 b_1}\right) \times\right.$$

$$\left.\times \left(1 - \frac{a_к^3 b_к}{a_1^3 b_1}\right) + a_2^2 \frac{n_2 a_2}{h_м}\right] \cdot 10^{-4}, \quad (8\text{-}58)$$

где a_1 — высота полого проводника, *мм*;

a_2 — высота сплошного проводника, *мм*;

b_1 — ширина полого проводника, *мм*;

b_2 — ширина сплошного проводника, *мм*;

n_1 — число полых проводников в пазу по высоте;

n_2 — число сплошных проводников в пазу по высоте;

$a_к$ — высота канала в полых проводниках, *мм*;

$b_к$ — ширина канала в полых проводниках, *мм*;

$b_м$ — ширина меди (голой) в пазу, *мм*;

$h_м$ — высота меди (голой) в пазу, *мм*;

$b_п$ — ширина паза, *мм*.

Как отмечалось, коэффициент k_s равен среднему значению для всех проводников паза, потери в которых зависят от их положения в пазу. При двухслойной стержневой обмотке среднее значение k_s для верхнего стержня примерно в 5 ÷ 7 раз больше среднего значения k_s для нижнего стержня [Л. 18].

Таким образом, добавочные электрические потери в обмотке статора

$$P_{э.доб} = (k_f - 1)\, P_э, \; квт. \quad (8\text{-}59)$$

Для крупных машин с косвенным воздушным охлаждением обычно k_f не превышает 1,3—1,4; для гидрогенераторов и турбогенераторов с водяным охлаждением обмотки статора k_f достигает 1,8—2.

Добавочные потери в стали при нагрузке синхронных машин определяются применительно к режиму короткого замыкания. Их относят к добавочным потерям короткого замыкания; при этом приближенно принимается, что добавочные потери в стали при нагрузке равны тем же потерям при коротком замыкании.

Потери в зубцах статора от третьей гармоники поля при коротком замыкании и $f = 50$ *гц*

$$P_{z3} \approx 10{,}7\, p_{10/50}\left(\frac{B_3}{10\,000}\right)^{5/4} \times$$

$$\times G_z \cdot 10^{-3}, \; квт, \quad (8\text{-}60)$$

где B_3 — индукция в зубцах от третьей гармоники поля:

$$B_3 = B_{z\,ср}(A_{3m} x_d + 1{,}27 A_{3d}\, x_{ad}), \; гс; \quad (8\text{-}61)$$

здесь:

$B_{zср}$ — индукция в среднем сечении зубца при $E_0 = U_н$, *гс*;

x_d, x_{ad} — индуктивные сопротивления, отн. ед.;

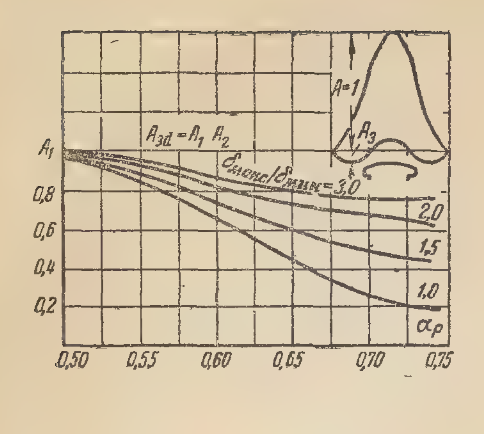
A_{3m}, A_{3d} — коэффициенты из кривых на рис. 8—6.

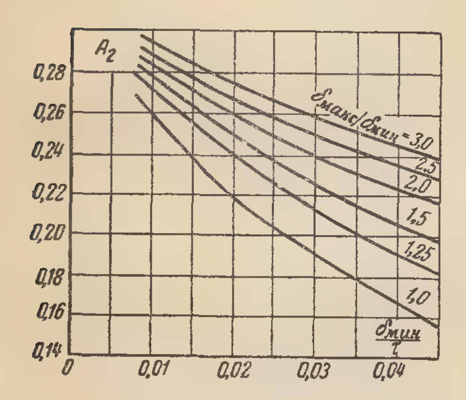
Потери на поверхности полюсных наконечников при коротком замыкании, вызванные высшими гармониками н. с. обмотки статора,

$$P'_{пов\,(к.з)} \approx \frac{2{,}1}{\sqrt[3]{q}} \times$$

$$\times \left(\frac{k_G\, x_{ad}}{k_\delta - 1}\right)^2 P_{пов}, \; квт, \quad (8\text{-}62)$$

где k_G — коэффициент, зависящий от коэффициента укорочения шага $k_у$ (рис. 8-7);





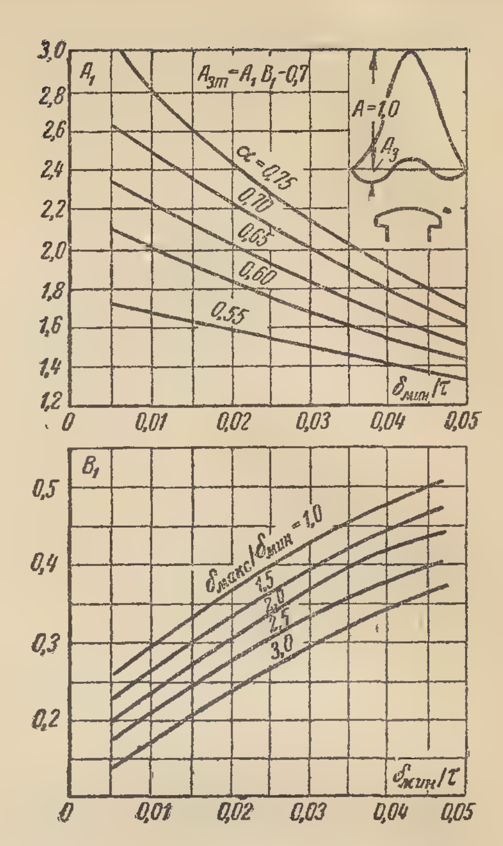


Рис. 8-6. К определению потерь в зубцах статора от 3-й гармоники поля при коротком замыкании.

$P_{пов}$ — поверхностные потери по (8-29) при $E_0=U_н$, *квт*.

Потери на поверхности полюсных наконечников при коротком замыкании, вызванные ступенчатостью кривой н. с. статора,

$$P''_{пов(к.з)} \approx k'\left[\frac{2px_{ad}}{Z_1(k_\delta-1)}\right]^2 P_{пов},\ квт, \tag{8-63}$$

где k' — коэффициент, зависящий от $\delta_м/\delta$:

$\delta_м/\delta$	1	1,5	2,0
k'	0,3	0,2	0,15

В крупных гидрогенераторах учитываются приближенно также потери, вызванные полями лобовых частей обмоток [Л. 111 и 58].

Потери в успокоительных обмотках синхронных машин обычно не учитываются.

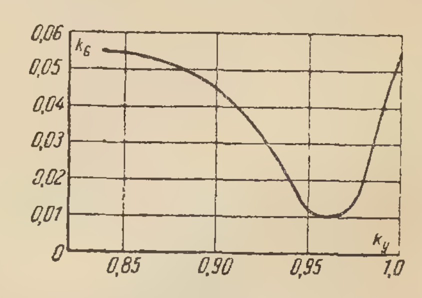


Рис. 8-7. К определению поверхностных потерь при коротком замыкании.

Следовательно, добавочные потери при нагрузке явнополюсных синхронных машин *

$$P_{доб} = P_{э.доб} + P_{z3} + P'_{пов\,(к.з)} + P''_{пов\,(к.з)},\ квт. \tag{8-64}$$

* Формулы для расчета добавочных потерь в турбогенераторах приведены в [Л. 114].

8-8. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Для определения к. п. д. электрической машины при ее номинальной нагрузке пользуются следующими формулами:

для генератора

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_{н} + \Sigma P}\right) \cdot 100\%; \quad (8\text{-}65)$$

для двигателя

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_{1н}}\right) \cdot 100\%, \quad (8\text{-}66)$$

где $P_{н}$ — номинальная активная мощность генератора, *квт;*

$P_{1н}$ — активная мощность, подводимая к двигателю при номинальной нагрузке, *квт;*

ΣP — сумма потерь в машине при номинальной нагрузке, *квт.*

Примерные расчеты потерь и к. п. д. для машин различных видов приводятся в гл. 12, 13 и 14.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

9-1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Проектирование электрической машины разделяется на два этапа: расчет и конструирование. При электромагнитном расчете по заданным номинальным параметрам (мощность, напряжение и скорость вращения) определяют основные размеры машины и ее обмоточные данные. Полученные результаты вносят в расчетную записку, являющуюся основанием для конструирования машины.

Конструирование электрической машины начинается с составления проектных чертежей продольного и поперечного разрезов, по которым определяют габаритные размеры и вес машины. Составление проектных чертежей является основной и самой ответственной частью процесса конструирования машины. Поэтому их нельзя рассматривать как простое геометрическое сочетание деталей и узлов электрической машины. По одной и той же расчетной записке можно спроектировать несколько вариантов конструкции, различающихся по габаритным размерам, весу, простоте и экономичности изготовления, удобству в обслуживании, надежности в эксплуатации и стоимости. Поэтому при конструировании машины конструктор должен учитывать все эти факторы.

Конструкция и технология электрической машины очень тесно связаны, так как в конструктивном проекте машины заложены основы технологии ее изготовления. Трудоемкость производства машины иногда зависит от конструкции в большей степени, чем от технологии. Если машина неудачно спроектирована, то даже применение сложных приспособлений и инструментов не может обеспечить требуемой производительности труда и высокого качества машины. Принцип технологичности конструкций заключается в том, что при разработке конструкции машины в равной степени учитываются как условия эксплуатации машины, так и требования, предъявляемые производством. Для выполнения этих условий работа конструктора и технолога координируется таким образом, чтобы технология обеспечивала высококачественное выполнение машины, а конструкция учитывала простоту ее изготовления. Требования технологичности конструкции иногда находятся в противоречии с основами электромагнитных расчетов машины. Тогда вопрос о том, какому принципу отдать предпочтение, решается на основании технико-экономических соображений.

Электрические машины проектируются как индивидуальные, так и серийные в виде машин возрастающей мощности. Принцип серийного производства имеет огромные преимущества. Он открывает возможности для широкой унификации деталей, укрупнения партии обрабатываемых деталей, связанного со значительным увеличением производительности труда. При серийном и особенно поточно-массовом производстве внедряются усовершенствованные технологические процессы, механизация ряда производственных операций, автоматические поточные линии, что не только увеличивает количество выпускаемых машин на тех же производственных площадях, но и повышает качество их изготовления.

В условиях социалистического планового хозяйства серии электрических машин превращаются в единые всесоюзные. Увеличение масштаба производства определяется не только ростом количества выпускаемых двигателей, но и проводимой специализацией электромашиностроительных заводов, при которой один завод производит только один или два габарита серии.

Принципы серийного производства предъявляют к расчету и конструкции машин ряд дополнительных требований, которые не имеют места при проектировании индивидуальных машин. В серийном производстве уделяется большое внимание унификации таких деталей, как подшипниковые щиты, подшипники, крышки подшипников, нажимные шайбы, коллекторы, щетки, щеткодержатели и т. п. Одноименные детали соседних типов электрических машин должны иметь подобные очертания, что позволяет быстро перестраивать поточные линии станков с обработки одной детали на обработку аналогичной детали двигателя другой мощности (валы). В конструкции деталей предусматриваются специальные технологические элементы, как, например, приливы на подшипниковых щитах для укрепления деталей в патроне токарного станка. Таких примеров можно привести очень много. Они разбираются ниже при описании конструкций отдельных типов электрических машин и их основных деталей.

Конструирование электрической машины в заводских условиях производится с широким применением заводских нормалей, которые являются обязательными для конструктора. На каждом заводе непрерывно ведется работа по нормализации, оказывающей огромное влияние на организацию и удешевление производства. Некоторые нормали, имеющие значение для всех электромашиностроительных заводов, становятся отраслевыми нормалями электротехнической промышленности. В качестве примера можно привести нормаль на диаметры статоров и якорей (приложение I).

Конструирование машины сопровождается необходимыми конструктивными расчетами, определяющими геометрические размеры деталей и напряжения в них при работе машины в наиболее невыгодных условиях.

9-2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К конструкционным материалам относятся все материалы, из которых изготовляются детали электрических машин, за исключением активных ее частей, т. е. магнитопровода, обмоток и их изоляции. Конструкционные материалы делятся на три группы: черные металлы, цветные металлы и пластмассы.

а) **Черные металлы.** К черным металлам, наиболее часто встречающимся в электромашиностроении, относятся литая сталь, серый чугун, ковкий чугун и различные сорта и профили прокатных сталей.

Литая сталь марок Ст.20Л, Ст.35Л, Ст.45Л (ГОСТ 977-58). В электрических машинах литая сталь применяется для магнитонагруженных деталей (станины машин постоянного тока, добавочные полюсы) и деталей с высокими механическими напряжениями (втулки коллектора, подшипниковые щиты тяговых и взрывозащищенных машин). В деталях простой формы литая сталь почти всюду заменена сварными деталями из листовой стали (ста-

нины нормальных машин, подшипниковые щиты).

Серый чугун марок СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-20, СЧ-28-48 (ГОСТ 1412-54) применяется для станин, подшипниковых щитов, стояков подшипников, стаканов подшипников скольжения машин общего применения. В машинах мощностью выше 240 *квт* чугунные детали заменяют сварными.

Ковкий чугун КЧ37-12 (ГОСТ 1215-59). Главное преимущество ковкого чугуна по сравнению с серым заключается в его большей пластичности и способности противостоять ударным знакопеременным нагрузкам, а также в высокой износоустойчивости. Из ковкого чугуна изготовляют методом отливки станины машин переменного тока, втулки и нажимные шайбы ротора, подшипниковые щиты, маховики, шкивы и полумуфты.

Прокатаная сталь поставляется различных сортаментов в зависимости от требуемой формы заготовок.

Сталь круглая (ГОСТ 2590-57 и 7414-57) применяется для валов, фланцев, различного рода втулок, шестерен и других мелких деталей.

Сталь шестигранная (ГОСТ 8560-57) применяется для изготовления болтов, гаек и других деталей, имеющих шестигранную часть под гаечный ключ. В целях снижения отходов при обработке болты крупных размеров изготовляют из круглой стали с высадкой шестигранной головки методом горячей штамповки или поковки.

Сталь квадратная (ГОСТ 2591-57 и 8559-57) применяется для изготовления пальцев щеткодержателей, стержней, на которых собирают шихтованные полосы, и других деталей.

Сталь листовая (ГОСТ 3680-57 и 5681-57) находит очень широкое применение в электрических машинах. Из листовой стали изготовляют листы полюсов машин постоянного тока и синхронных машин, сварные втулки ротора, фундаментные плиты, стояки подшипников и другие детали. Из нее склепывают или сваривают вентиляторы, распорки между пакетами сердечников, крышки коллекторных люков и вентиляционных отверстий, кожухи и направляющие диффузоры.

Жесть белая листовая (ГОСТ 9488-60) и ленточная (ГОСТ 7530-61). Жесть представляет собой листовую сталь толщиной от 0,18 до 0,5 *мм*, покрытую с обеих сторон слоем олова горячим способом (поставляется в рулонах). Она применяется для изготовления скрепок проволочных бандажей, табличек с обозначением номинальных данных машин, кожухов микродвигателей. Жесть хорошо штампуется, поддается пайке, устойчива против коррозии.

Углеродистая стальная холоднотянутая проволока. В электрических машинах она применяется для пружин щеткодержателей, запоров крышек коллекторных люков, пружин под катушки роторов синхронных машин и других деталей.

Стальная холоднокатаная термообработанная лента (ГОСТ 2614-55) применяется для пружин щеткодержателей, пружинных рамок полюсных катушек и запоров крышек коллекторных люков.

Проволока стальная луженая бандажная (ГОСТ 9124-59) выпускается двух классов: **Н** — немагнитная из хромоникелемарганцовистой стали и **М** — магнитная из стали марок 50 и 70. Она поставляется в бухтах и выпускается следующих диаметров: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0 *мм*. Проволоку диаметром 1,5 *мм* для проектируемых машин применять не рекомендуется.

б) **Цветные металлы.** *Алюминиевые литые сплавы* (ГОСТ 2685-53) нашли широкое применение в электрических машинах, особенно в микромашинах, авиационном электрооборудовании и переносных агрегатах. Основным преимуществом алюминиевых сплавов перед чугунным и стальным литьем являются меньший вес и возможность применения прогрессивных методов литья (литье под давлением, прецизионное литье). Недостатком алюминиевых сплавов являются ненадежность резьбы и малая износоустойчивость. Для устранения этих недостатков трущиеся поверхности и резьбы армируют

втулками. Наибольшее применение нашли следующие алюминиевые сплавы:

Ал-2 — алюминиево-кремнистый сплав. Применяется для тонких деталей сложной конфигурации путем литья под давлением, в кокиль и земляные формы.

Ал-9 — алюминиево-кремнистый сплав с добавкой магния. Применяется для статически нагруженных деталей сложной конфигурации, требующих высокой герметичности. Детали отливают под давлением, в кокиль и земляные формы.

Ал-11 — алюминиево-кремнисто-цинковый сплав. Применяется для крупных деталей сложной формы, несущих большие статические нагрузки. Детали отливают в кокиль и земляные формы.

Алюминиевое литье в электрических машинах применяется для станин, подшипниковых щитов, крышек подшипников, вентиляторов, заливки роторов, заливки постоянных магнитов синхронных генераторов и других деталей.

Литые сплавы с содержанием меди. ЛС 59-1Л — латунь свинцовистая (ГОСТ 1019-47). Отливается центробежным способом и по выплавляемым моделям. В электрических машинах применяется для отливки токоведущих деталей.

ЛК 80-3Л — латунь кремнистая (ГОСТ 1019-47). Отливается в земляные и металлические формы. В электрических машинах применяется в основном для отливки щеткодержателей.

БрОЦС 6-6-3 — оловянно-цинково-свинцовая бронза (ГОСТ 613-50). Отливается в земляные и металлические формы. Применяется в электрических машинах для деталей, работающих на трение (втулки, вкладыши, червячные колеса).

Кроме цветного литья, в электромашиностроении широкое применение находит сортовой прокат из цветных металлов.

Л62 — латунь. Поставляется в виде проволоки, лент, листов и прутков круглого, квадратного и шестигранного сечений. Применяется для деталей, изготовляемых штамповкой, глубокой вытяжкой и обработкой.

ЛС59-1 — латунь свинцовистая. Поставляется в виде проволоки, ленты, листов и прутков круглого, квадратного и шестигранного сечений. Применяется для деталей, изготовляемых ковкой, штамповкой и механической обработкой (винты, гайки, контактные болты).

Антифрикционные сплавы. Баббиты кальциевые марок БКА и БК2 (ГОСТ 1209-59). Баббиты оловянные марок Б-89 и Б-83 (ГОСТ 1320-55). Баббиты свинцовые марок Б-16, Б-6, БН и БТ (ГОСТ 1320-50).

Применяются для заливки втулок, сегментов и вкладышей подшипников скольжения. В связи с широким распространением подшипников качения применение баббитов для машин малой и средней мощности весьма ограничено.

Припои. Припои разделяются на мягкие и твердые. Из мягких в электромашиностроении наибольшее распространение получили оловянно-свинцовые припои (ГОСТ 1499-54) следующих марок: ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50, ПОС-40, ПОС-30, ПОС-18. Цифрами обозначено процентное содержание олова в припое.

В целях повышения нагревостойкости и механической надежности соединений во многих случаях мягкие припои заменяют меднофосфористыми припоями марок ПМФ-7 и ПМФ-9, где цифрами обозначено процентное содержание фосфора.

В соединениях, работающих на удар и изгиб, применяют серебряные припои, например марки ПСр-71, содержащий 71% серебра, 28% меди и 1% фосфора. Прочность соединения, спаянного этим припоем, превышает прочность меди.

в) **Пластмассы.** Пластмассами называют материалы, которые в процессе переработки в изделия приобретают пластичность, способны принимать нужную форму и сохранять ее. В исходном состоянии пластмассы представляют собой порошки, состоящие из искусственных смол с наполнителем в виде древесной муки, хлопковых, асбестовых и стеклянных волокон или тканей и бумаг. В качестве наполнителей применяют также слюдяной и кварцевый порошки.

В зависимости от типа смолы пластмассы разделяют на термореактивные и термопластичные. Термореактивные пластмассы в процессе горячего прессования затвердевают и переходят в неплавкое состояние. Термопластичные пластмассы способны размягчаться при последующем нагревании.

Наибольшее распространение получили термореактивные пластмассы на основе фенольно-формальдегидных смол резольного типа. К ним относятся пластмассы К-6 и АГ-4.

Масса К-6 с минеральным волокнистым наполнителем из асбестовых волокон применяется для изготовления деталей, к которым предъявляются повышенные требования по механической прочности и теплостойкости.

В последние годы успешно применяется пластмасса типа АГ-4, которая обладает высокой механической и электрической прочностью в сочетании с теплостойкостью и хорошими технологическими свойствами. Различают две разновидности этой пластмассы: АГ-4В и АГ-4С.

В пластмассе АГ-4В в качестве наполнителя применяют нарезанное и распушенное стеклянное волокно, а в пластмассе АГ-4С — длинные ориентированные нити. Эти пластмассы изготовляются на основе модифицированной фенольно-формальдегидной смолы Р-2.

В электромашиностроении из термореактивных пластмасс изготовляют дощечки зажимов, изоляционные втулки и другие детали. Еще больший эффект получают при опрессовке металлических деталей, например щеточных пальцев, коллекторов и др. Особенно широкое применение пластмассы находят в производстве микромашин, где из них прессуют даже наружную оболочку машин. При этом отпадает ряд операций механической обработки деталей.

Термопластичные пластмассы используют для опрессовки обмотанных изделий, например полюсных катушек или лобовых частей обмотки якоря.

9-3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Прежде чем приступить к конструированию машины, надо выбрать конструктивную форму исполнения, которая определяется условиями монтажа, системой вентиляции характером внешней среды, а также соотношением ее размеров. Конструктивное исполнение машины определяется защитой ее от влияния окружающей среды, расположением подшипников и креплением машины.

По способам защиты от влияния внешней среды электрические машины разделяются на следующие виды.

Открытая электрическая машина, выполненная без специальных приспособлений для предохранения от случайного прикосновения к вращающимся и токоведущим частям, а также не имеющая специальных приспособлений для предотвращения попадания внутрь машины посторонних предметов. Открытые электрические машины могут выполняться как естественно охлаждаемые, т. е. без приспособлений для усиления вентиляции, так и самовентилируемые, т. е. снабженные вентилятором на роторе. Открытые электрические машины применяются в машинных залах и лабораториях.

Защищенная электрическая машина, снабженная специальными приспособлениями для предохранения от случайного прикосновения к ее вращающимся и токоведущим частям, а также для предотвращения попадания внутрь нее посторонних предметов. У защищенных машин выводы должны быть закрыты специальной коробкой, а отверстия в подшипниковых щитах — решетками или сетками. Машины защищенного исполнения могут применяться только в закрытых помещениях, так как они не защищены от дождя.

Каплезащищенная электрическая машина — защищенная машина, снабженная приспособлениями для предохранения от попадания внутрь нее капель влаги, падающих отвесно. В каплезащищенных машинах на все отверстия, расположенные в верхней части станины и под-

шипниковых щитов, устанавливают глухие крышки или жалюзи.

Брызгозащищенная электрическая машина — защищенная машина, снабженная приспособлениями для предохранения от попадания внутрь нее водяных брызг, падающих под углом 45° к вертикали с любой стороны. У таких машин отверстия, расположенные в верхней части станины или подшипниковых щитов, должны быть закрыты глухими заглушками, а на отверстиях, расположенных на боковых сторонах, должны быть установлены жалюзи. Брызгозащищенное исполнение является самым распространенным в современных сериях электрических машин. Такие машины могут быть установлены на открытом воздухе.

Закрытая электрическая машина, у которой внутреннее пространство отделено от внешней среды, но не настолько плотно, чтобы ее можно было считать герметической. Закрытые машины применяются в пыльных помещениях. Охлаждение закрытых машин производится вентилятором, насаженным на консольный конец вала, который производит обдув наружной поверхности станины (см. рис. 9-9).

Водозащищенная машина выполнена таким образом, что при обливании ее водой из брандспойта вода не проникает внутрь машины. Такие машины выполняются с усиленными уплотнениями крышек при помощи резиновых прокладок, а выступающий конец вала пропускается через специальный сальник. Водозащищенные машины применяются главным образом в судовых установках.

Взрывозащищенная электрическая машина — закрытая машина, выполненная таким образом, что она может противостоять взрыву внутри нее газов, которые могут там накопиться, и не допускать воспламенения взрывчатых и горючих газов, содержащихся в окружающей среде, при искрении или взрыве внутри электрической машины. Наружная оболочка таких машин испытывается до сборки машины на плотность и прочность избыточным давлением воды до 8 *ат*, а щели между металлическими поверхностями, через которые внутреннее пространство машины сообщается с окружающей средой, должны иметь такую длину, чтобы пламя при взрыве внутри машины не могло проникнуть в окружающую среду. Взрывозащищенные машины применяются в угольных шахтах с определенным содержанием метана и на некоторых предприятиях химической промышленности.

Герметическая электрическая машина — закрытая машина, у которой все отверстия закрыты настолько плотно, что при определенном наружном давлении исключается всякое сообщение между внутренним пространством машины и газовой средой или жидкостью, окружающей машину извне. Таким образом, герметическая машина может работать, даже будучи погруженной в воду.

По расположению и форме подшипников, а также по способу крепления и монтажа электрические машины имеют несколько форм исполнения (ГОСТ 2479-65), из которых наиболее употребительными являются следующие.

Исполнение машины с двумя подшипниками, помещающимися в подшипниковых щитах, со свободным концом вала, без фундаментной плиты имеет условное обозначение М-1. Такое исполнение является наиболее распространенным для машин с наружным диаметром до 1 *м* (см. рис. 9-1, 9-2 и 9-7). Машины устанавливают на салазки (при ременной передаче), стальные конструкции, деревянные брусья, каменный или сталебетонный фундамент. При наличии на конце вала широкого шкива для ременной передачи изгибающий момент на конце вала становится очень большим для щитового подшипника и поэтому добавляется третий стояковый подшипник легкого типа. Такие машины выполняются на общей фундаментной плите со стояковым подшипником и имеют обозначение М-6.

Для машин большой мощности подшипниковые щиты становятся слишком громоздкими. Кроме того,

мощные машины выполняются с разъемной станиной, поэтому для облегчения сборки и разборки этих машин подшипниковые щиты заменяют стояковыми подшипниками с разъемными головками и вкладышами. Такое исполнение обозначается М-7. Наиболее распространенным исполнением является форма с двумя стояковыми подшипниками со свободным концом вала на фундаментной плите (см. рис. 9-3 и 9-4). Иногда стояковые подшипники применяют и для машин небольшой мощности в случае очень большой длины коллектора (машины для гальванопластики).

Машины с фланцевым креплением обозначаются М-3 (см. рис. 9-6). Они выполняются с подшипниковыми щитами и имеют несколько разновидностей: с фланцем на подшипниковом щите со стороны привода, с фланцем на станине, с фланцем на подшипниковом щите со стороны, противоположной приводу. Кроме фланца, они могут иметь лапы на станине.

Машины с вертикальным валом применяются довольно часто в качестве электродвигателей в сверлильных станках, электроверетенах, ручных инструментах и в качестве генераторов — возбудителей вертикальных синхронных машин с передачей вращения при помощи клиновых ремней (см. рис. 9-20). Машины с вертикальным валом обозначаются М-8. Они строятся как с лапами на станине, так и с фланцевым креплением. Горизонтальные машины малой мощности на шарикоподшипниках обычно допускают вертикальную установку без всякой переделки конструкции. В машинах большей мощности ставят специальные подпятники, воспринимающие нагрузку, действующую вдоль вала. В вертикальном исполнении строятся почти все гидрогенераторы.

9-4. КОНСТРУКЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) **Единая серия П машин постоянного тока.** Серия построена на 11 диаметрах якоря и двух длинах для каждого диаметра. Скорости вращения двигателей соответствуют синхронным 600, 750, 1000, 1500 и 3000 *об/мин*, а скорости вращения генераторов — скоростям вращения асинхронных двигателей с учетом скольжения и составляют 2850 *об/мин* для габаритов 1—6 и 1450 *об/мин* для габаритов 7—11.

Машины серии П спроектированы в защищенном (П) и закрытом исполнениях. Последние выполняются с обдувом наружной поверхности станины вентилятором, расположенным на консольном конце вала (исполнение ПО), и охлаждением внутреннего воздуха путем пропускания его через внешний трубчатый радиатор (исполнение ПР).

В серии принята твердая шкала мощностей при всех скоростях вращения. Применение кремнийорганической изоляции дало снижение веса машин в среднем на 27%. Вес машин серии П ниже веса машин передовых зарубежных фирм, а к. п. д. их выдержан на уровне к. п. д. этих машин. Диаметры якорей выбраны с учетом раскроя листов электротехнической стали на полосы.

Конструкция подшипниковых узлов в серии принята бескапсульной, что упрощает изготовление и обеспечивает центричность якоря по отношению к полюсам. В машинах габаритов 1—6 с обеих сторон приняты одинаковые шарикоподшипники средней серии. В машинах габаритов 7—11 подшипник со стороны привода — роликовый, а со стороны коллектора — шариковый. Выбор типа роликоподшипника сделан с учетом удобства разборки машины. Во всех машинах серии предусмотрена защита от радиопомех.

Проведена широкая унификация деталей, причем число передних подшипниковых щитов сократилось с 28 до 8, задних — с 70 до 9, коробок выводов — с 7 до 3, траверс щеткодержателей — с 7 до 4, коллекторов — с 6 до 4. Маховой момент якоря снижен на 40%. В конструкции предусмотрено осуществление на базе основного исполнения модификаций при минимальных затратах.

Конструкция машины П-52. На рис. 9-1 представлена конструкция машины П-52, являющаяся типич-

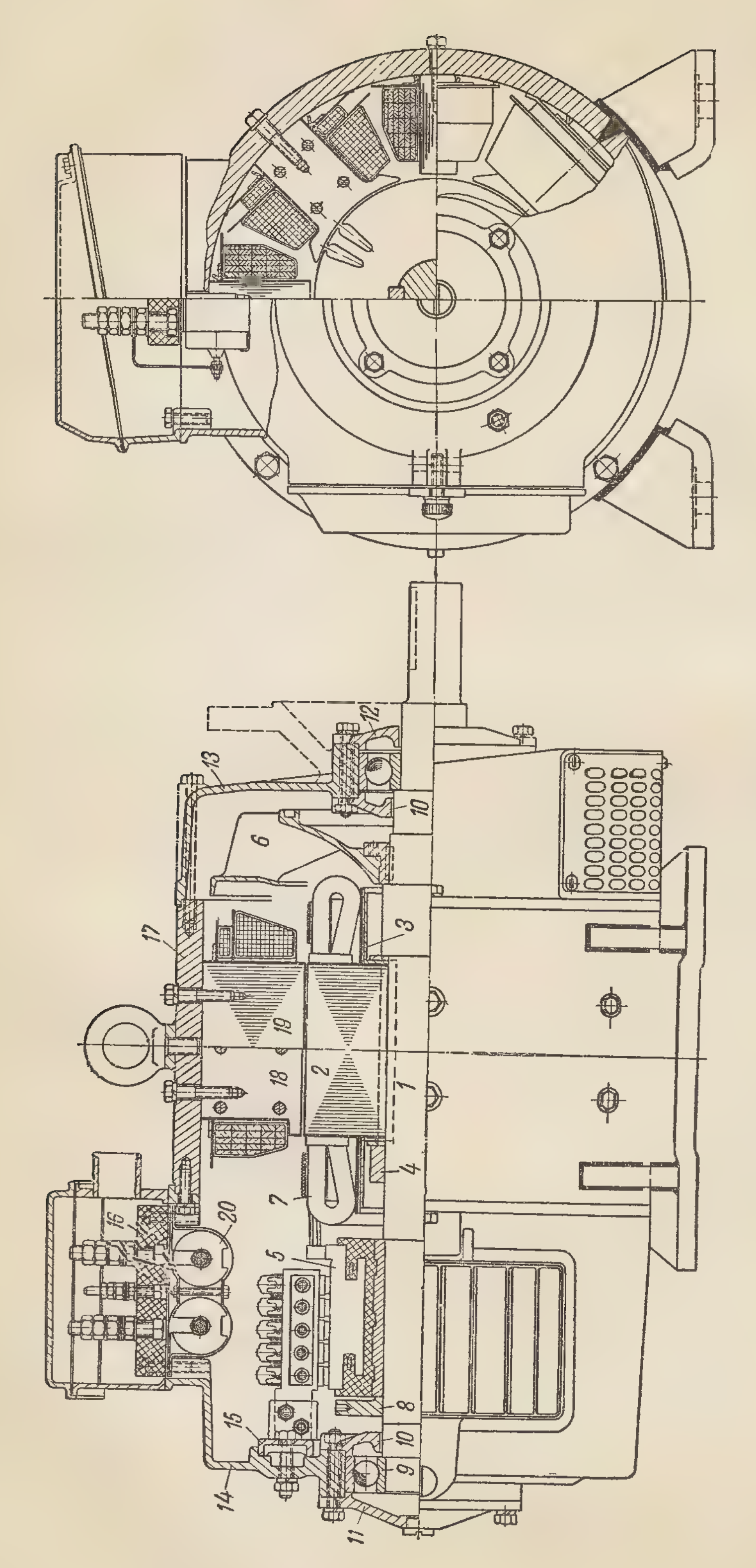


Рис. 9-1. Машина постоянного тока П-52.

ной для серии габаритов 1—6. Вал *1* спроектирован с плавными переходами от одной ступени к другой, что обеспечивает малую трудоемкость токарной обработки. На среднюю часть вала собираются листы сердечника якоря *2* с полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой из проводников круглого сечения. По торцам сердечника поставлены изоляционные листы с пазами для предохранения обмотки от пробивания изоляции об острые углы зубцов. Сердечник спрессован между двумя нажимными шайбами, состоящими из штампованных чашек и плоских стальных шайб. Отвороты чашек служат поддержкой для лобовых частей обмотки. Для предохранения от пробивания изоляции обмотки на отвороты нажимных шайб намотана изоляция *3*, материал которой подбирается в соответствии с классом изоляции якорных катушек. Такая же изоляция проложена между слоями лобовых частей. Со стороны привода сердечник упирается в бортик вала, а со стороны коллектора он запирается втулкой *4*.

В двигателях первой половины серии предусмотрены коллекторы на пластмассе, которая удерживает коллекторные пластины *5* за выштампованные в них углубления прямоугольной формы. Для присоединения концов обмотки якоря *7* в коллекторные пластины впаяны ленточные петушки. Обмотка удерживается в пазах клиньями, а лобовые части — проволочными бандажами. Пазовые гильзы выступают из пазов с торцов якоря на 8—10 *мм* с каждой стороны.

Аксиальная вентиляция машины осуществляется литым алюминиевым вентилятором *6*, насаженным на вал со стороны привода. Воздух забирается через жалюзи в крышках коллекторных люков и выбрасывается в нижнее отверстие подшипникового щита *13*, закрытое штампованной сеткой. Якорь охлаждается только с наружной поверхности, так как в сердечнике и коллекторе вентиляционные каналы отсутствуют. В осевое отверстие вентилятора залита стальная втулка, так как посадка алюминия на вал недостаточно надежна ввиду мягкости алюминия и изнашиваемости его при повторных посадках. Втулка имеет борт с нарезанными в нем отверстиями, которые служат для ввертывания шпилек съемника при разборке машины. Для предохранения от проворачивания вентилятора на валу при реверсах втулка вентилятора насажена на шпонке.

Вентилятор представляет собой два кольца, соединенных ребрами, которые являются лопастями вентилятора. Следует обратить внимание на то, что верхняя кромка нижнего кольца и нижняя кромка верхнего кольца лежат на одной горизонтальной линии. Это сделано для того, чтобы обеспечить формовку в двух половинах формы, раскрывающихся в осевом направлении. Если бы кромки колец перекрывались, то для образования камер вентилятора между лопастями пришлось бы в каждую камеру вводить стержень в радиальном направлении. Верхнее кольцо имеет отворот для повышения жесткости и защиты от завихрения воздуха. В нижнем кольце отлита кольцевая канавка для укрепления в ней балансировочных грузов. Но динамическая балансировка, применяемая для якорей и роторов быстроходных машин, требует расположения грузов в двух плоскостях вблизи подшипников. Поскольку на коллекторе из пластмассы нельзя укрепить балансировочные грузы, предусмотрено специальное кольцо *8* со стороны коллектора. Балансировка осуществляется путем просверливания в нем радиальных отверстий.

У шарикоподшипника *9* со стороны коллектора наружное кольцо зажато между бортиками крышек *10* и *11*. Поэтому он фиксирует положение якоря в осевом направлении и воспринимает осевые нагрузки. Между кольцом шарикоподшипника со стороны привода и бортиками крышек *10* и *12* оставлены линейные зазоры, являющиеся компенсаторами теплового удлинения вала и суммы отклонений деталей от номинальных размеров. В отверстие в торце наружной крышки *11* со стороны коллектора ввернут

винт, для того чтобы через это отверстие можно было вводить кожку тахометра, не снимая крышки. Уплотнения камер подшипников осуществляются за счет узких щелей между валом и крышками подшипников. Наружные кольца шарикоподшипников вставлены непосредственно в отверстия подшипниковых щитов *14* и *13*, что значительно упростило конструкцию подшипниковых узлов по сравнению с машинами серии ПН, в которых между подшипниками и щитами вставлены промежуточные детали, носящие название капсюлей. Крышки подшипников скрепляются четырьмя болтами, для которых в них просверлены отверстия. Во внутренних крышках сделаны углубления для гаек, чтобы они не проворачивались при затяжке болтов.

В подшипниковом щите *14* проточена кольцевая выточка, в которую вставляется траверса *15* щеткодержателей. Она притягивается к торцу щита болтами. Освободив гайки этих болтов, можно передвигать траверсу по окружности для установки щеток в нейтралях. Для этого сделаны продолговатые прорези для болтов. К траверсе при помощи болтов прикреплены пальцы щеткодержателей, представляющие собой планки из текстолита. Соединение между щеткодержателями на пальце выполнено при помощи медной полоски.

Станина *17* выполнена из стальной трубы с приваренными к ней легкими штампованными лапами. Для центрирования подшипниковых щитов на наружной поверхности трубы проточены кольцевые пояски. Такое соединение называется наружным замком. Болты для крепления задних подшипниковых щитов *13* пропущены через приливы на торце щита. Для предохранения от самоотвертывания болты защищены пружинными шайбами. Утолщение для ввертывания в станину подъемного кольца выполнено в виде кружка, приваренного к стенке трубы.

Выводы от обмоток подведены к контактным болтам, закрепленным в дощечке зажимов *16*. Выводное устройство помещено в коробке, закрытой снаружи штампованной крышкой.

К станине привернуты болтами главные и добавочные полюсы с надетыми на них катушками. На продольном разрезе машины справа показан главный полюс *19* с катушкой, а слева — добавочный полюс *18* с катушкой. Главные полюсы штампуются из стали Э11. В проекте серии П предполагалось применение холоднокатаной стали для уменьшения ширины полюсного сердечника. На главный полюс надета катушка параллельного возбуждения, а сверху — небольшая катушка последовательного возбуждения. Изоляция катушек от полюса производится опрессовкой сердечника полюса. Закрепление катушек на полюсе сделано при помощи пружинной рамки. Для регулировки воздушного зазора между станиной и полюсом вложены тонкие прокладки из листовой стали.

Добавочный полюс также шихтуется из штампованных листов, но не в поперечном, а в продольном направлении. Сердечник полюса короче якоря на 20 *мм*; за счет этого по торцам образуются выступы для опоры катушек. Добавочный полюс также опрессован изоляцией.

Конструкция машины П-92. На рис. 9-2 показана конструкция машины П-92. Принцип конструкции несколько отличается от машины П-52. Листы якоря *1* имеют открытые пазы и вентиляционные отверстия, расположенные в два ряда в шахматном порядке. Нажимные шайбы *2* отлиты из чугуна и представляют собой три кольца, связанные ребрами. Хотя нажимные шайбы не передают вращающего момента, но они, так же как и листы якоря, насажены на вал на шпонке. Это сделано для того, чтобы листы якоря, набранные на вал, имели некоторый запас длины сердечника для спрессовки. Нажимная шайба якоря со стороны коллектора запирается втулкой *3*, напрессованной на вал.

Втулка коллектора *4* представляет собой чугунную отливку без внутреннего обода. Она опирается

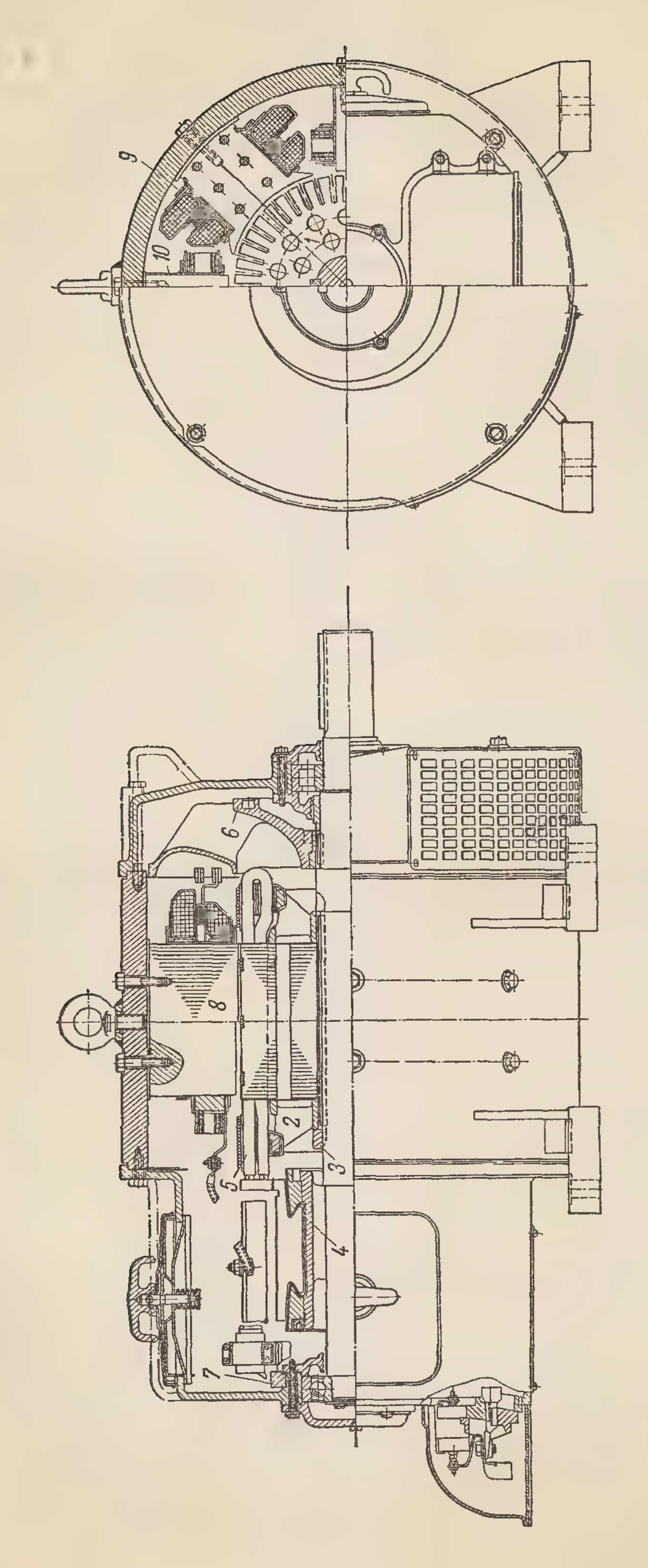


Рис. 9-2. Машина постоянного тока П-92.

на вал тремя ребрами. Нажимные конусы откованы из стали и надеты на втулку. Наличие приставных конусов освобождает втулку от центробежных сил пластин коллектора и потому она может быть отлита из чугуна. Промежутки между ребрами *служат каналами для охлаждающего* воздуха. Охлаждение втулки понижает температуру меди коллектора на 8—10° С. В коллекторные пластины впаяны ленточные петушки для соединения с выводами обмотки якоря. Обмотка якоря *5* состоит из одновитковых секций, и поэтому со стороны коллектора катушка не имеет гнутой головки. Пазовые и лобовые части обмотки удерживаются бандажами. Конструкция вентилятора *6* такая же, как у двигателя П-52. Обращает на себя внимание небольшая щель между лобовыми частями обмотки и нижней кромкой верхнего кольца вентилятора. Это сделано не случайно. В этой машине охлаждающий воздух проходит вдоль вала двумя параллельными потоками — через каналы якоря и промежутки между катушками полюсов. Количество воздуха в параллельных путях распределяется обратно пропорционально корню квадратному из отношения аэродинамических сопротивлений воздушных путей. Поскольку каналы между катушками значительно шире якорных, бо̀льшая часть воздуха прошла бы около катушек. Но основные потери машины сосредоточены в якоре, поэтому он нуждается в усиленном охлаждении. Сужение прохода воздуха между лобовыми частями и вентилятором служит для того, чтобы создать дополнительное сопротивление для воздуха, идущего между катушками, и тем увеличить количество воздуха, протекающего через каналы якоря.

В соответствии с распределением нагрузок подшипник со стороны привода выбран роликовый, а со стороны коллектора — шариковый. При такой конструкции роликоподшипник является линейным компенсатором, так как ролики могут свободно передвигаться вдоль внутреннего кольца, не имеющего бортиков. Осевая нагрузка воспринимается шарикоподшипником, поэтому его внутреннее кольцо заперто на валу при помощи шайбы, прижатой болтами, ввернутыми в торец вала. Траверса *7* надета на заточку подшипникового щита со стороны коллектора и удерживается бортом крышки подшипника. Пальцы щеткодержателей выполнены из угловой стали, что обеспечивает необходимую жесткость при небольшом весе.

Главные полюсы *8* набраны из штампованных листов стали. Катушка параллельного возбуждения разделена на две части для увеличения поверхности охлаждения. Дистанционной прокладкой между половинами катушки служит небольшая катушка последовательного возбуждения. Рамка *9*, удерживающая катушки от перемещения вдоль полюса, врезана в специальные пазы, выштампованные в листах полюса. Добавочные полюсы в этом двигателе сплошные. Катушка удерживается на полюсе при помощи специального держателя *10*, лапки которого огибают катушку снизу и сверху.

б) **Серия П-100 машин постоянного тока.** Серия выполняется на пяти диаметрах якоря и типы машин соответственно имеют обозначения П-101, П-102, П-103, П-104 и П-105. Машины первых трех габаритов изготовляются с двумя подшипниковыми щитами в каплезащищенном исполнении, а машины П-104 и П-105 — в открытом исполнении с разъемной станиной и стояковыми подшипниками на фундаментной плите. Предусмотрена конструкция с одним стояковым подшипником для случаев, когда конец вала двигателя жестко соединяется с приводом.

На рис. 9-3 представлена конструкция машины типа П-104. Особенностью конструкции является то, что почти все детали, которые ранее выполнялись литыми, выполнены сваркой. Вторая особенность заключается в том, что эта машина на двух стояковых подшипниках, но с подшипниками качения. По способу защиты от влияния окружающей

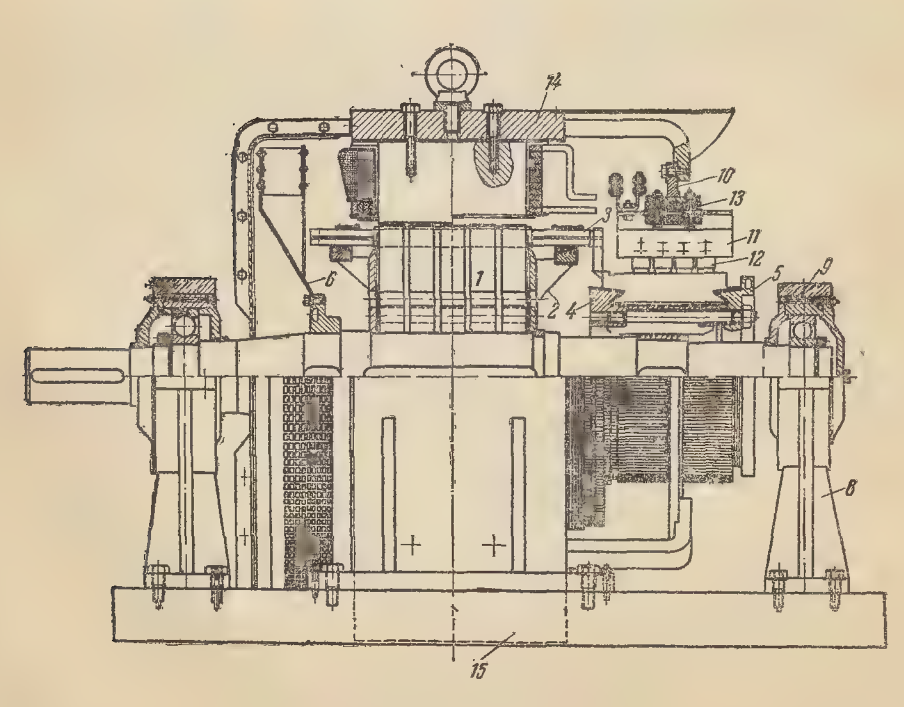


Рис. 9-3. Машина постоянного тока П-104

среды это машина открытого типа; она имеет только решетку над вентилятором по требованиям техники безопасности и легкий штампованный козырек над коллектором для предохранения от попадания на коллектор посторонних предметов.

Листы якоря *1* собирают на вал, спрессовывают между двумя нажимными шайбами *2* и запирают стальным кольцом, которое на половину толщины входит в проточенную на валу канавку. Этот способ прост и не требует много материала, но не применяется в машинах малой мощности, так как канавка ослабляет вал. В крупных машинах по условиям жесткости вал имеет большой запас прочности, и поэтому канавки не опасны. Нажимные шайбы *2* сварного типа и состоят из дисков, вырезанных из листовой стали, и кольцевых обмоткодержателей, скрепленных с дисками при помощи приваренных ребер. Обмотка якоря *3* стержневого типа состоит из полусекций, соединяемых хомутиками, которые пропаивают.

Втулка коллектора *4* является примером сложной сварной конструкции. Обод втулки имеет переменное сечение, он составлен из трех частей — двух массивных колец, между которыми вварена тонкая труба. Ступица втулки представляет собой кольцо, соединенное с ободом при помощи вваренных ребер. Экономичность такой конструкции определяется кузнечными заготовками деталей с малыми припусками на обработку. Ко втулке коллектора приставляется нажимной конус *5*, выточенный из кованой заготовки. Соединение нажимного конуса со втулкой производится при помощи длинных шпилек. При большой длине коллекторных пластин это необходимо. Температурные удлинения пластин при нагреве коллектора компенсируются удлинением шпилек под действием приложенных к ним усилий. В нажимном конусе проточена канавка для крепления балансировочных грузов. Для соединения с проводниками обмотки якоря в коллекторные пластины вставлены и запаяны ленточные петушки.

С противоположной стороны якоря на вал насажен вентилятор *6*, состоящий из массивной кованой втулки и привернутого к ней диска вентилятора с лопатками и соединительным кольцом. Во втулке вентилятора проточена канавка для балансировочных грузов. Вентилятор огражден решеткой *7*, привернутой к разъемной рамке из угловой стали, которая болтами привернута к торцу станины.

Сварная конструкция стоякового подшипника *8* отличается от применявшихся ранее литых. Литые стояки с подшипниками скольжения отливались коробчатого сечения с масляной камерой (см. рис. 9-16). Они имели много внутренних пустот сложной формы, требовавших при формовке применения сухих стержней. При замене подшипника скольжения шарикоподшипником отпала необходимость в масляных камерах. Для упрощения сборки машины головка подшипника сделана разъемной в горизонтальной плоскости. Подшипник заключен в кольцевой капсюль *9* для предохранения наружного кольца от деформаций при затяжке болтов головки подшипника и защиты подшипника в разобранной машине. Капсюль с обеих сторон закрывается крышками, отлитыми из чугуна. Эти крышки — единственные детали, которые сохранились литыми в этой машине. Стойка подшипника имеет крестообразное сечение и состоит из пластины с приваренными с обеих сторон ребрами. Получилась легкая и достаточно жесткая конструкция. Пластина и ребра приварены к основанию из листовой стали. Конструкция стойки подшипника наглядно показывает, что при разработке сварных конструкций не следует копировать форму литой детали, а надо приспособить ее к новой технологии. При этом деталь получает новый внешний вид, необычный для литой детали.

К торцу станины приварены угольники, к которым болтами крепится траверса *10*. На ней укреплены при помощи хомутиков бракеты *11* с привинченными к ним щеткодержателями *12*. Бракеты изоли-

рованы от траверсы при помощи изоляционных прокладок *13*.

Станина *14* разъемная для упрощения монтажа и транспортировки машины. Половины станины согнуты из листовой стали. Разъем станин машин постоянного тока делают не по горизонтальному диаметру, а несколько выше, так как на концах горизонтального диаметра помещаются добавочные полюсы. Таким образом, при разборке машины все полюсы остаются на своих местах и надо только разъединить соединительные шины между катушками. В старых конструкциях к обеим половинам станины приваривали или приливали массивные брусья вдоль всей станины и в них помещали болты, скрепляющие верхнюю половину с нижней. В машинах П-104 и П-105 для соединительных болтов приварены только легкие полукруглые бобышки к верхней половине станины. Болты ввертывают непосредственно в плоскость разъема нижней половины.

Всякая машина на стояковых подшипниках должна иметь фундаментную плиту для установки лап станины и стояков, так как иначе нельзя выдержать равномерность воздушного зазора между якорем и полюсами. Фундаментная плита *15* сварена из листовой стали и при небольшом весе имеет достаточную жесткость.

Внешний вид машины показан на рис. 9-3а.

в) **Конструкция турбовозбудителей.** На рис. 9-4 представлена конструкция возбудителя турбогенератора мощностью 300 *квт* на 3 000 *об/мин*. В средней части вала *5* профрезерованы пазы. На ребра, образованные между ними, насажены листы якоря и спрессованы между нажимными шайбами *6*. Сердечник якоря разделен радиальными вентиляционными каналами на пять пакетов. В пазы якоря вложены катушки лягушечьей обмотки, которые в пазах удерживаются клиньями, а на лобовые части их намотаны проволочные двухслойные бандажи *7*. Концы обмотки якоря впаяны в ленточные петушки коллектора. Для защиты мест пайки обмотки якоря от расшатывания применена консольная посадка коллекторной втулки на вал.

Коллекторные пластины *14* удерживаются тремя бандажами кольцами *15*. В двух кольцах проточены канавки трапецеидального сечения для балансировочных грузов. На кольцо со стороны якоря насажен двухкамерный центробежный

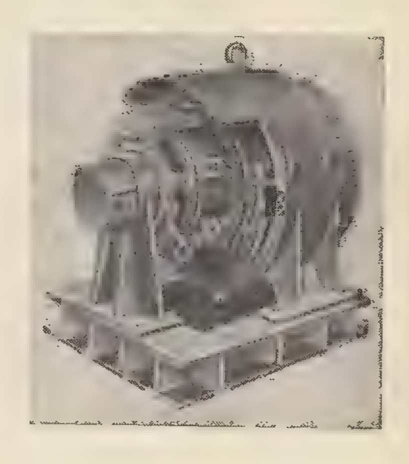


Рис. 9-3а. Внешний вид машины П-104.

вентилятор. Над вентилятором установлены улитки *11*, отводящие воздух в камеры фундаментной рамы *22*, где он охлаждается, проходя мимо трубок воздухоохладителей *23*. Для улавливания из воздуха пыли в фундаментной раме установлены фильтры *21*.

Сварная неразъемная станина возбудителя *9* крепится на лапах к фундаментной раме. К ней прикреплен кожух *10*, обеспечивающий замкнутую систему вентиляции возбудителя. По торцам кожуха установлены щиты, имеющие уплотнения с валом. К станине привернуты болтами главные *24* и добавочные *27* полюсы. На главные полюсы надеты катушки *26* шунтовой обмотки и катушки *25* обмотки автоматического регулятора напряжения. В пазы главных полюсов вложены стержни компенсационной обмотки, которые соединяются дугами *8*. Катушки *28* добавочных полюсов намотаны на ребро из меди прямоугольного сечения.

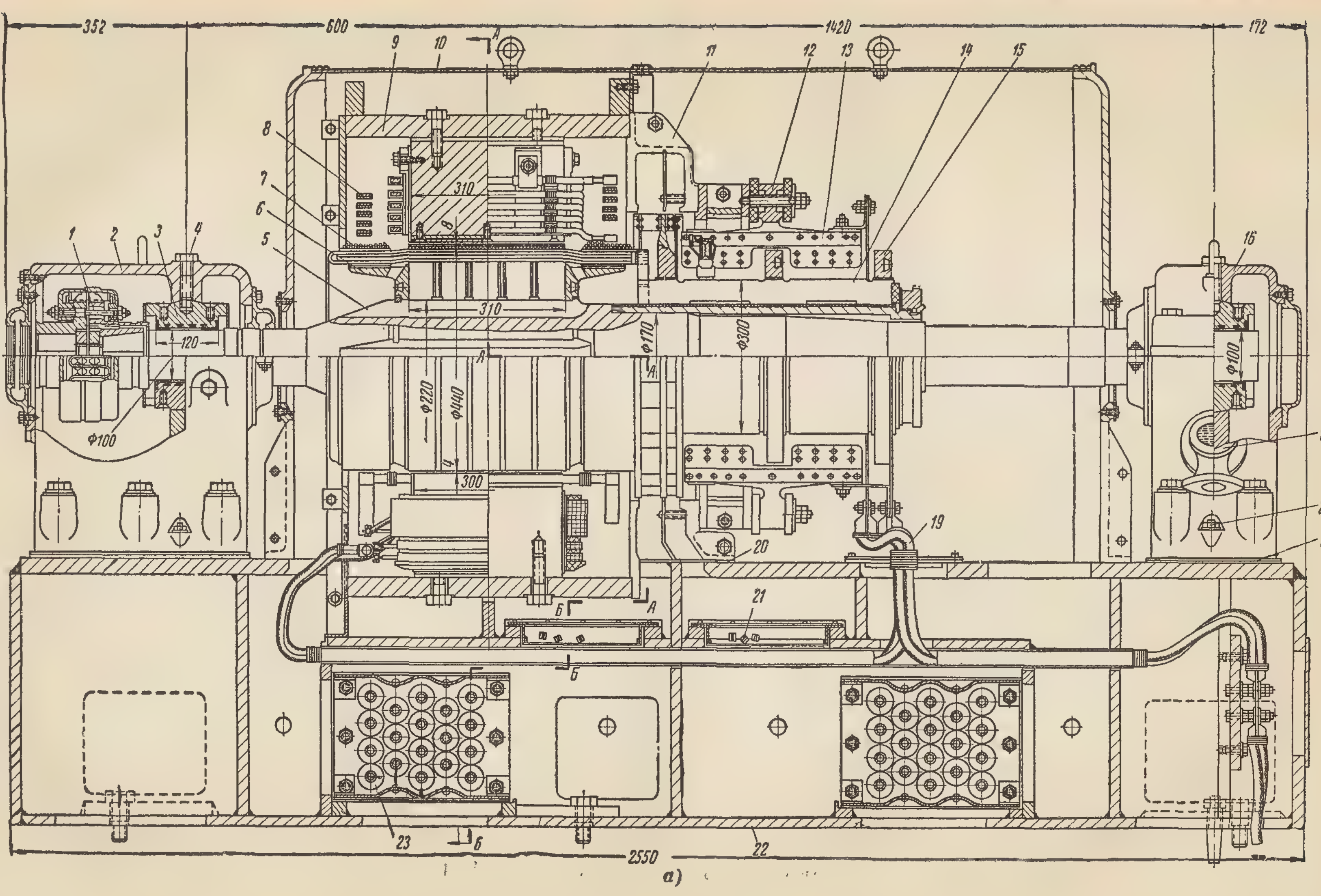


Рис. 9-4. Возбудитель турбогенератора.

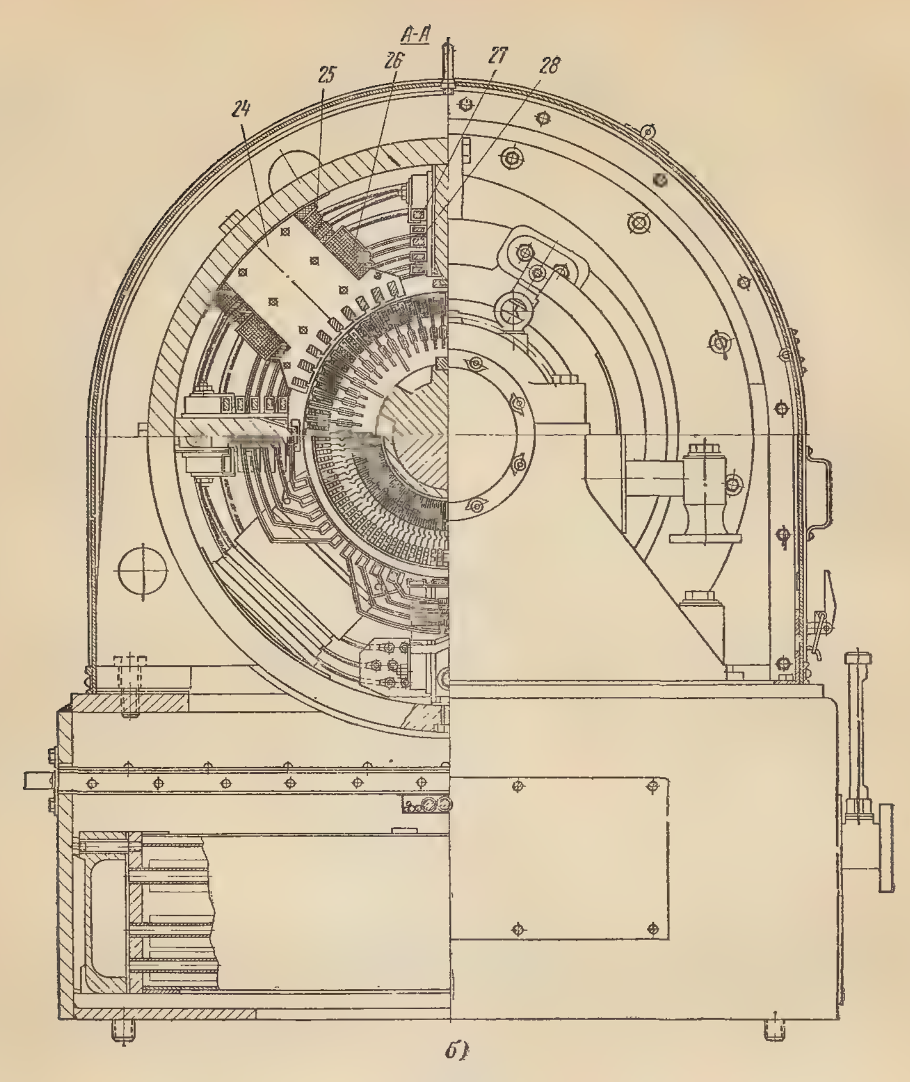


Рис. 9-4а.

Над коллектором установлена траверса щеткодержателей, к которой через изоляционные прокладки привернуты бракеты *12* с укрепленными на них щеткодержателями. Ток якоря от собирательных шин отводится во внешнюю цепь по гибким проводам *19*.

Шейки вала опираются на стояковые подшипники *2* и *16*. В разъемных головках подшипников подвижно зажаты вкладыши *3* с шаровой наружной поверхностью, позволяющей вкладышу самоустанавливаться по линии вала. Трущаяся поверхность вкладышей залита баббитом. Для предохранения вкладышей от проворачивания служат болты *4*, концы которых входят в отверстия в верхней половине вкладыша. Стояки подшипников изолированы от фундаментной рамы прокладками из гетинакса *18* для разрыва цепи подшипниковых токов. Смазка подшипников жидкая принудительная от масляного насоса паровой турбины. Масло подается в подшипник и отводится от него через фланцы *17*. Возбудитель сочленен с валом турбогенератора эластичной муфтой *1*, благодаря чему вибрации генератора не передаются на возбудитель, что привело бы к расшатыванию и поломке петушков коллектора. Передача вращающего момента осуществляется при помощи

стальной ленты, охватывающей пальцы полумуфт. Элементы муфты помещены в общую камеру с подшипником, что обеспечивает смазку муфты от той же масляной системы. Фундаментная рама *22* коробчатого типа сварена из листовой стали. Она обладает необходимой жесткостью при небольшом весе. Для фиксирования положения стояков подшипников и станины на раме служат установочные штифты *29*. Болты и установочные штифты должны быть изолированы от рамы при помощи изоляционных трубок. Фланцы и болты маслопровода также изолированы изоляционными прокладками и трубками.

Аналогичную конструкцию имеют быстроходные электродвигатели постоянного тока.

г) **Конструкции крупных машин.** Отличительными особенностями крупных машин постоянного тока мощностью в несколько тысяч киловатт являются шихтованные из сегментов сердечники якоря и ярма, сдвоенные коллекторы, жесткое соединение валов, позволяющее строить электрическую машину с одним стояковым подшипником, защищенное конструктивное исполнение, разъемная станина, крепление коллектора к якорной втулке.

На рис. 9-5 показана конструкция генератора постоянного тока мощностью 5 000 *квт* на 500 *об/мин*. Сердечник якоря *13* собран из сегментов и разделен радиальными вентиляционными каналами на шесть пакетов. Для повышения жесткости зубцов якоря и улучшения его вентиляции служат нажимные пальцы, установленные между торцами сердечника и нажимными шайбами сварного типа *11* и *15*. В обмоткодержателях сделаны вырезы для подвода охлаждающего воздуха к лобовым частям обмотки якоря. В пазы якоря вложена неразрезная лягушечья обмотка *16*, концы *10* которой припаяны к петушкам коллекторных пластин. В крупных машинах низкого напряжения длина коллектора достигает нескольких сотен миллиметров. Такой коллектор по механическим соображениям нельзя выполнять из целых пластин, поэтому прибегают к сдвоенной конструкции коллектора. По длине машины расположены две пластины *3*, опирающиеся в средней части на общую втулку сварного типа *5* и зажатые двумя нажимными конусами *8*, которые стягиваются длинными шпильками *7*, компенсирующими температурные удлинения пластин. При числе пластин, достигающем нескольких сотен, возможны угловые сдвиги между пластинами. Для компенсации этих сдвигов пластины двух коллекторов соединены гибкими медными пластинами *4*. Для разгрузки соединений петушков коллектора с обмоткой якоря от вибраций втулка коллектора насажена не на вал, а на консоль втулки якоря *14*. Втулка якоря сварного типа состоит из ступицы с приваренными к ней двумя дисками, на которые опираются продольные балки, служащие базой для сборки сегментов сердечника якоря. Сегменты стянуты болтами, проходящими через выштампованные в них отверстия. Ступица насажена на вал с натягом горячей посадки второго класса точности. Для повышения надежности посадка выполнена ступенчатой на две соседние ступени вала.

Щеткодержатели привинчены к массивным бракетам *2*, которые изолированно укреплены на лучах разъемной траверсы *6*, привинченной к торцу станины. Ток якоря через собирательные шины отводится во внешнюю цепь через медные шины *27* в нижней части станины.

В крупных машинах постоянного тока ярмо статора делается не массивным, а шихтованным. Благодаря этому снижается влияние вихревых токов на коммутацию при переходных режимах. В этой машине статор состоит из корпуса *12* сварного типа и ярма *25*, шихтованного из сегментов, штампованных из листовой стали толщиной 1—2 *мм*. Сегменты стянуты болтами, проходящими через отверстия в боковых стенках корпуса. В ободе и ярме просверлены радиальные отверстия для крепления главных *20* и добавочных *22* полюсов. Статор выпол-

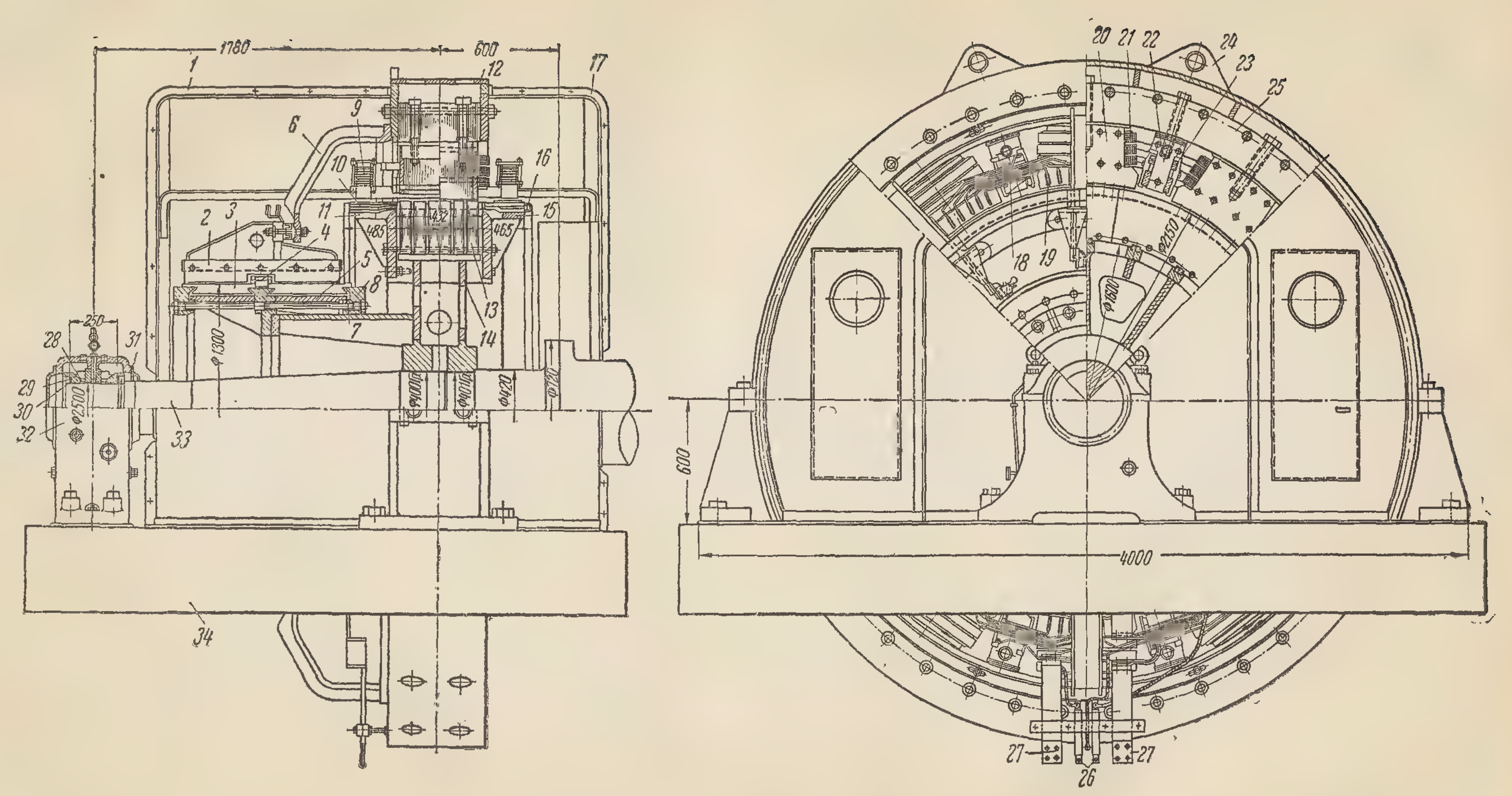


Рис. 9-5. Генератор постоянного тока 5 000 *квт.*

нен разъемным по горизонтальному диаметру для упрощения монтажа и транспортировки машины. В верхней части корпуса приварены подъемные ушки *24*.

Катушки *21* главных полюсов для улучшения охлаждения выполнены секционированными с прокладками между отдельными секциями. Выводы катушек *26* расположены в нижней части станины. В пазах главных полюсов вставлены стержни *19* компенсационной обмотки, которые соединяются дугами *18*, скрепленными хомутами *9*. Добавочные полюсы собраны из штампованных листов Т-образной формы для увеличения поверхности прилегания полюса к ободу. Между полюсами и ободом предусмотрены прокладки П-образной формы для регулировки воздушного зазора. В расширенной части добавочных полюсов запрессованы круглые стержни с резьбой для болтов, крепящих полюс к ободу. Катушки *23* добавочных полюсов намотаны из шинной меди и прикреплены к полюсам болтами со скобами.

Фланец вала скреплен болтами с фланцем вала приводного двигателя. Шейка второго конца вала *33* опирается на стояковый подшипник, стойка *32* которого установлена на фундаментной плите *34*. Вкладыши *29* подшипника имеют баббитовую заливку *30*. Смазка к шейке вала подается двумя смазочными кольцами *28*. Для предохранения от растекания масла вдоль вала служит лабиринтное уплотнение *31*.

К торцу станины прикреплены передний *1* и задний *17* щиты, защищающие генератор от попадания в него посторонних предметов.

9-5. КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные электродвигатели являются самыми распространенными электрическими машинами. Они изготовляются в виде единых всесоюзных серий. Асинхронные двигатели общего применения образуют четыре серии, объединяющие следующие диапазоны мощностей:

а) малые электродвигатели мощностью до 600 *вт* (микродвигатели);

б) электродвигатели мощностью 0,6—100 *квт*;

в) электродвигатели мощностью 100—1 000 *квт*;

г) электродвигатели мощностью свыше 1 000 *квт*.

а) **Единая серия асинхронных двигателей мощностью до 600 *вт*.** Малые асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором выполняются в закрытом обдуваемом исполнении с алюминиевой оболочкой. Серия построена на трех наружных диаметрах статора с двумя длинами в каждом диаметре. Двигатели имеют следующие обозначения типов: буквы АОЛ обозначают асинхронный обдуваемый в алюминиевой оболочке; затем следуют цифры; первая обозначает условный номер габарита (наружный диаметр статора): 0, 1, 2. Вторая цифра обозначает условный порядковый номер длины активной стали, например АОЛ-12. В габарите 0 длины обозначаются двойными цифрами (11 и 12) во избежание совпадений с обозначениями коллекторных двигателей.

На рис. 9-6 показана конструкция двигателя АОЛ-11. Ротор двигателя *1* собран на оправке, на которой он спрессовывается и заливается алюминием, а затем насаживается на вал. Вал под посадку ротора подвергается рифлению на станке с последующей шлифовкой. Получающиеся выступы на валу врезаются в отверстия в листах ротора и обеспечивают прочное соединение ротора с валом.

На шейки вала напрессованы в нагретом состоянии шарикоподшипники *2* одинаковых размеров, что обеспечивает унификацию деталей подшипниковых узлов. Подшипники снаружи закрыты крышками *3*, отлитыми под давлением из алюминия.

По защите от влияния окружающей среды двигатель является закрытым обдуваемым. На консоль вала со стороны, противоположной приводу, насажен вентилятор *4*, отлитый под давлением из алюминия.

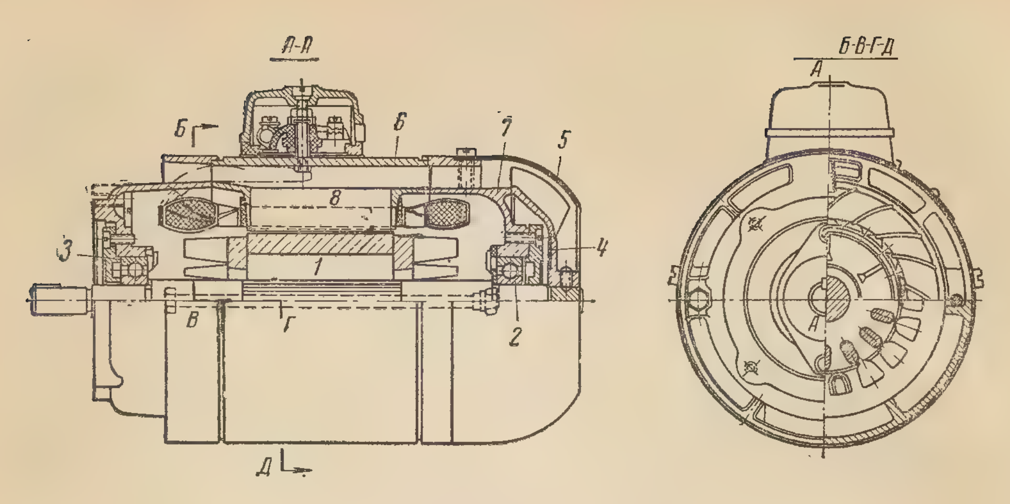


Рис. 9-6. Асинхронный микродвигатель АОЛ-11.

Он закрыт колпаком *5*, в средней части которого имеются отверстия для забора воздуха. Воздух при помощи вентилятора прогоняется через каналы в наружной оболочке *6*, которая представляет собой трубу с ребрами внутри. Подшипниковые щиты *7* не имеют отверстий, и поэтому внутреннее пространство двигателя полностью изолировано от окружающей среды. Самым оригинальным в этой конструкции является соединение пакета статора с оболочкой. Листы пакета статора *8* набирают на внутреннюю оправку, спрессовывают на ней, затем вставляют в машину для литья под давлением и заливают в алюминиевую оболочку. Алюминий заходит и на торцевые поверхности статора и скрепляет листы пакета. Таким образом, сердечник статора и наружная оболочка получаются в виде одного нераздельного целого. Этим в значительной степени упрощается весь технологический процесс изготовления статора. Оболочка может быть очень тонкой, так как пакет статора придает ей необходимую жесткость. В пазы статора вложены катушки всыпной обмотки, концы которой присоединены к дощечке зажимов на боковой стороне оболочки.

Однофазные двигатели выполняются как модификация трехфазных.

б) Единые серии асинхронных двигателей мощностью 0,6—100 ***квт.*** *Единая серия двигателей* А и АО. В 1952 г. была введена в производство единая серия двигателей, которая заменила девять разрозненных серий двигателей, выпускавшихся ранее, причем число типоразмеров сократилось со 179 до 19. Электродвигатели единой серии по способу защиты от влияния окружающей среды имеют два исполнения: брызгозащищенное (А) и закрытое обдуваемое (АО).

Единая серия построена на стандартизованной шкале мощностей (ГОСТ 4542-52) на семи внешних диаметрах статора и 19 длинах активной стали. Основное исполнение двигателей — с короткозамкнутым ротором, залитым алюминием. В цифровом обозначении двигателя первая цифра указывает условный порядковый номер габарита, вторая — порядковый номер сердечника и третья (через тире) — число полюсов обмотки статора. Например, АО-52—4.

Общие принципы конструкции. В основу конструкции двигателей единой серии положен ряд новых принципов, которые не применялись в старых сериях.

1. Вся серия выполнена с полузакрытыми пазами статора и всыпными обмотками из круглого провода. Ранее двигатели мощностью 30 *квт* и выше изготовлялись с полуоткрытыми пазами и жесткими катушками из прямоугольного провода. Внедрение всыпных обмоток

снизило трудоемкость изготовления и позволило унифицировать технологические процессы статорных обмоток.

2. В двигателях брызгозащищенного исполнения применена радиальная двусторонняя система вентиляции вместо применявшейся ранее в большинстве двигателей старых серий аксиальной системы вентиляции. Это дало возможность сделать конструкцию двигателя симметричной относительно вертикальной оси и унифицировать детали подшипниковых узлов.

3. Пакеты статора набирают на внутреннюю оправку, на которой их спрессовывают и запирают скобами. После этого статор обматывают, пропитывают и в готовом виде запрессовывают в станину. Сборка листов статора на внутреннюю оправку позволила избежать обработки внутренней поверхности статора, так как она получается достаточно гладкой. Это снижает потери в стали за счет замыкания листов резцом при обработке и устраняет брак обмоток, изоляция которых повреждалась отогнутыми при обработке зубцами или металлическими стружками.

4. Двигатели, как правило, выполняются без дощечек зажимов с шестью выпущенными из станины гибкими проводниками с надетыми на них бирками, на которых выбиты обозначения начал и концов фаз. Это упростило изготовление двигателей.

5. Наружные диаметры статоров всех двигателей выбраны из нормализованного ряда, благодаря чему листы электротехнической стали при штамповке раскраиваются на полосы без остатков. Это повысило использование электротехнической стали и разгрузило штамповочные цехи от остающихся после раскроя полос.

6. В единой серии проведена широкая унификация деталей, открывающая возможность организации поточно-массового производства.

7. При разработке конструкции деталей разработаны и внедрены в производство новые принципы технологичности конструкций.

8. Достигнута взаимозаменяемость установочных размеров двигателей типов А и АО, что упрощает их замену.

Два отрезка единой серии охватывают: 1) двигатели 3, 4 и 5-го габаритов; 2) двигатели 6, 7, 8 и 9-го габаритов. Особенностью отрезков серии является то, что двигатели первого отрезка выпускаются методами массово-поточного производства, а двигатели второго — методами серийного производства. Это объясняется тем, что потребность в двигателях малой мощности значительно превышает потребность в двигателях средней мощности. Поэтому в первом отрезке серии преимущество отдается технологичности конструкции, а во втором — энергетическим показателям двигателей.

Основные различия конструкций двигателей двух отрезков серии заключаются в следующем:

1. В двигателях трех первых габаритов обмотка статора однослойная концентрическая. Преимущества ее заключаются в том, что катушки вкладывают в пазы обеими сторонами и они не мешают укладке следующих катушек. Это дало возможность применять полуавтоматические обмоточные станки для статоров. Единственным недостатком однослойных обмоток является то, что они не допускают укорочения шага. Поэтому в двигателях второго отрезка серии применены двухслойные обмотки с укорочением шага.

2. Двигатели второго отрезка серии выполняются только с чугунными станинами и подшипниковыми щитами. Двигатели 3 и 4-го габаритов в закрытом обдуваемом исполнении имеют модификацию конструкции в алюминиевой оболочке, аналогичную конструкции двигателей мощностью до 600 *вт*. Применение алюминия дало возможность внедрить литье под давлением и встроить литейные участки в общий поток производства.

3. Двигатели трех первых габаритов имеют рифленые валы, на которые напрессовывают сердечники роторов, залитые алюминием. При посадке ротора на рифленый вал

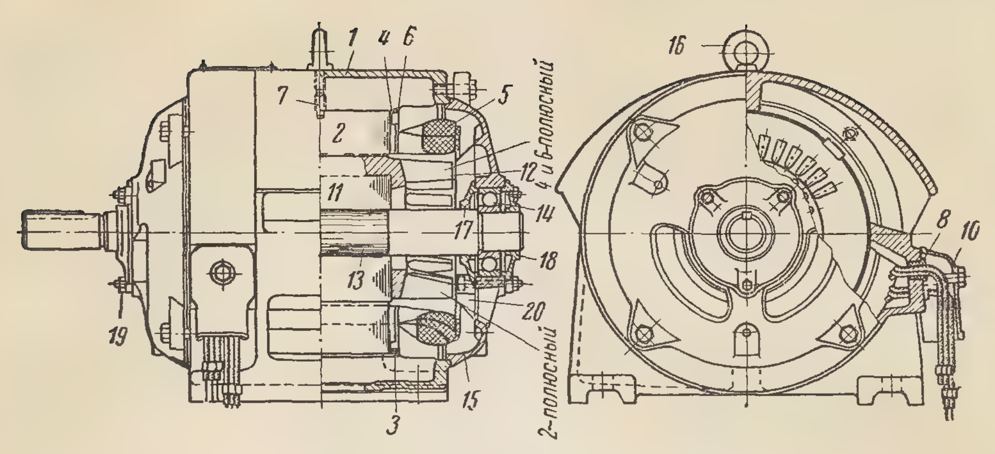


Рис. 9-7. Асинхронный двигатель А-41.

легко выполнить скос пазов путем смещения отдельных листов в тангенциальном направлении. В двигателях второго отрезка серии сердечники ротора насажены на вал на шпонке. Поскольку скошенные шпонки создают технологические трудности при фрезеровании валов и насадке сердечников на вал, пазы ротора выполняют прямыми, а скос пазов переносят на сердечник статора.

4. Предохранение пакетов статора от распушения у электродвигателей первого отрезка серии достигается благодаря жестким стальным нажимным кольцам, которые скрепляют теми же скобами, что и листы статора. В статорах двигателей второго отрезка серии дополнительно применены крайние листы с зубцами без коронок и несколько бо̀льшими размерами пазов. С каждого торца статора ставят несколько таких листов, сваренных точками.

Имеются и другие, более мелкие различия конструкций двигателей первого и второго отрезков серии, отмеченные в описаниях их конструкций.

Конструкция двигателя А-41. На рис. 9-7 показана конструкция двигателя брызгозащищенного исполнения А-41, являющегося представителем первого отрезка серии.

Пакет статора *2* скреплен скобами *3* из полосовой стали, которые приварены дуговой сваркой по торцам статора. Нажимные шайбы статора *4* согнуты из полосовой стали толщиной 2 *мм*, затем сварены и выгнуты штампом в форме угольника с кольцевой полукруглой канавкой. Такой способ изготовления обеспечивает безотходное использование материала и отсутствие обработки на станках. Форма профиля придает нажимной шайбе необходимую жесткость при минимальном весе.

В пазы статора вкладывают катушечные группы однослойной концентрической обмотки *5*; лобовые части катушек переплетаются, что обеспечивает малую величину вылета лобовых частей. На рисунке показаны лобовые части двух-, четырех- и шестиполюсных машин, которые размещаются в одном и том же подшипниковом щите, что способствует унификации деталей двигателей с различными скоростями вращения.

К лобовым частям обмотки привязаны лентой проводники, соединяющие катушки, катушечные группы и фазы. Лобовые части катушек по выходе из пазов проходят через пазы изоляционных колец *6*, открытые в сторону ротора. Этим катушки обмотки предохраняются от повреждения изоляции углами зубцов статора, а выступающие концы пазовых гильз защищаются от разрывов при отгибании лобовых частей обмотки.

Обмотанный и пропитанный статор запрессовывают в станину *1*, отлитую из чугуна марки СЧ12-28. Пакет статора удерживается в станине

от сдвигов в осевом и тангенциальном направлениях при помощи шпильки *7*, ввернутой в отверстие с резьбой в одном из ребер станины. Статор сидит в станине на четырех ребрах, между которыми образуются каналы для охлаждающего воздуха. В верхнее ребро станины ввернуто подъемное кольцо *16*.

Вал *13* выточен из цилиндрической заготовки прокатной стали марки Ст. 40 Ввиду малой высоты и небольшого числа ступеней при обработке снимается мало стружки, чем достигается высокая производительность токарных операций, а прочность концов вала повышается. Это дало возможность предусмотреть технологические канавки в галтелях вала для выхода шлифовального круга. Конфигурация валов двигателей первого отрезка серии выполнена одинаковой, что дает возможность обработки их на одной автоматической станочной линии с простейшей перестройкой ее на обработку с одного вала на другой.

Ротор *11* залит алюминием вместе с крыльями вентилятора *12* на замыкающих кольцах беличьей клетки. Листы ротора набирают на оправке со скосом пазов и заливают алюминием в машине для литья под давлением. Ротор, снятый с оправки, насаживают на рифленую поверхность вала и обрабатывают совместно с шейками вала под подшипники, что обеспечивает минимальное биение ротора при вращении в подшипниках.

Оба шарикоподшипника *14* выбраны одинаковых размеров, чем достигается унификация подшипниковых щитов *15* и крышек подшипников *17* и *18*. Для того чтобы сделать длины ступиц подшипниковых щитов одинаковыми, оставляют зазоры между шарикоподшипниками и бортиками крышек подшипников с обеих сторон. Таким образом, в этой конструкции нет подшипника с зажатым наружным кольцом. Зазоры выбирают в пределах 0,5—0,8 *мм*, чтобы обеспечить возможность расширения вала при нагревании. Делать зазоры слишком большими нельзя, так как при ослаблении посадки наружного кольца подшипника в подшипниковом щите образуется недопустимое осевое перемещние ротора и вращающиеся части двигателя могут задевать за неподвижные. Поэтому такая конструкция требует повышенной точности обработки деталей.

Торец вала со стороны, противоположной приводу, не закрыт крышкой *18*, как это делалось в машинах старых серий. Благодаря этому достигается унификация наружных крышек подшипников *18* с обеих сторон двигателя, упрощается выполнение модификации двигателя с двумя выпущенными концами вала и представляется возможность измерять тахометром скорость вращения ротора без снятия крышки. Такая конструкция не нарушает требований техники безопасности, так как вращающийся торец вала гладкий и не может нанести травму.

В двигателях трех первых габаритов вместо уплотнительных канавок в крышках подшипников сделаны конические щели между валом и расточками в крышках подшипников. Ширина щели равна 0,4 *мм* со стороны подшипника и 0,2 *мм* с противоположной стороны. Таким образом, на пути вытекающих частиц смазки встречается суживающаяся щель, чем и обеспечивается удержание смазки в камере подшипника. Крышки подшипников стянуты тремя болтами *19*, пропущенными через отверстия в подшипниковых щитах. Головки болтов утоплены в пазах, предохраняющих от проворачивания болта при затягивании гайки.

Подшипниковые щиты *15* отлиты из чугуна марки СЧ12-28. Они имеют сквозные внутренние отверстия, что позволяет разбирать двигатель без снятия подшипников с вала, а обработку щитов вести за одну установку на станке и тем добиваться более точной соосности между станиной и щитами. На наружном ободе подшипникового щита отлиты четыре прилива для болтов, крепящих щит к станине. Эти приливы и торцевые поверхности станины отодвинуты от плоскости

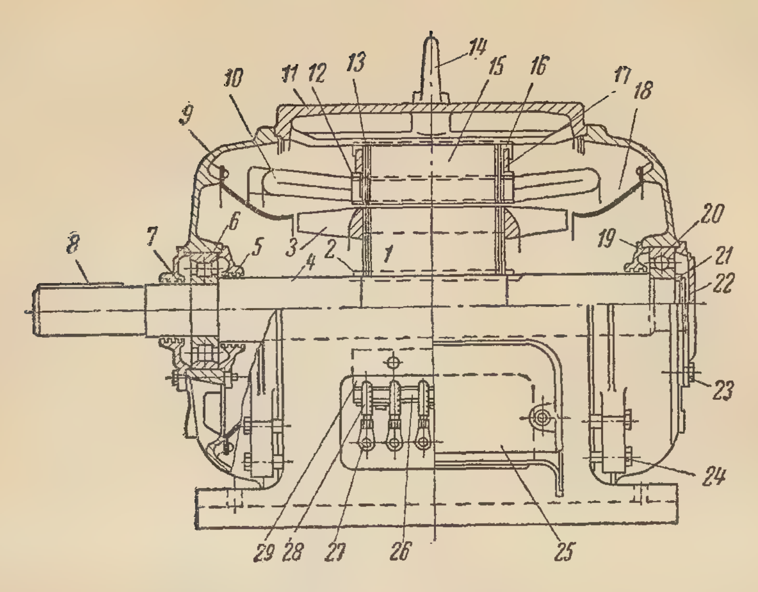


Рис. 9-8. Асинхронный двигатель А-81.

прилегания щита к станине. Этим достигается обработка щита без поперечной подачи резца, так как поверхность обработки представляет собой узкий кольцевой поясок. Таким образом, экономится время на обработку и упрощается технологический процесс. В нижней части подшипниковых щитов отлито по два отверстия для забора охлаждающего воздуха, который прогоняется через двигатель лопатками вентиляторов. Для направления воздуха и повышения эффективности работы вентилятора служат два штампованных из листовой стали диффузора *20*, которые прикреплены к пояску, отлитому на внутренней стенке подшипникового щита. Диффузоры защищают двигатель также от попадания в него воды при направлении струи под углом 45° к вертикали, как это видно на разрезе нижней половины двигателя. Таким образом, осуществляется брызгозащищенное исполнение двигателя. Наличие диффузоров защищает от попадания рук в лопатки вентилятора. Поэтому на наружной поверхности двигателя отсутствуют всякого рода заглушки, решетки и жалюзи, которые трудоемки в производстве и неудобны в эксплуатации.

Ввиду сферической формы подшипникового щита его нельзя при обработке зажать в кулачки патрона станка. Для удобства обработки на внешней поверхности щита отлиты три прилива. Зажав щит в патрон за эти приливы, можно произвести всю токарную обработку, не снимая щита со станка. Этим достигается концентричность обрабатываемых поверхностей, обеспечивающая равномерность воздушного зазора по окружности статора.

Корытообразное сечение станины, торцы которой соединены ребрами, придает ей необходимую жесткость. К окружности станины прилиты лапы коробчатого сечения, имеющие достаточную прочность и небольшой вес. Опорные балки лап также имеют коробчатое сечение, благодаря чему уменьшается поверхность обработки и создается хорошая устойчивость двигателя на плоскости.

Конструкция двигателя А-81. На рис. 9-8 показана конструкция двигателя А-81. Статор *15* собран из лакированных листов на внутреннюю цилиндрическую оправку, опрессован между двумя нажимными шайбами *17*, согнутыми из полосовой стали, и скреплен скобами *16*, которые приварены дуговой сваркой к нажимным шайбам и в некоторых точках к пакету статора. Для предупреждения от распушения зубцов

по краям статора положены крайние листы *13*, сваренные попарно точками. В зубцах торцевых крайних листов выштампованы канавки для увеличения жесткости. Пакет статора запрессован в станину *11*, в которой он обматывается и пропитывается. Для упрощения изготовления ротора скос пазов сделан на статоре.

Обмотка статора у двигателей второго отрезка серии двухслойная с укороченным шагом. Пазовая гильза состоит из двух слоев пленкокартона, представляющего собой электрокартон, оклеенный триацетатной пленкой. Замена пленкокартоном трехслойной гильзы из двух полосок электрокартона с проложенной между ними полоской лакоткани уменьшает общую толщину гильзы и устраняет воздушные промежутки между ними, сильно снижающие теплопроводность гильз. Пазовые гильзы должны выступать из пазов на 15—20 *мм* с каждой стороны. Для предохранения выступов пазовых гильз от разрывов при отгибании лобовых частей между гильзами и нажимными шайбами статора проложены полоски электрокартона *12*. К лобовым частям обмотки *10* привязаны лентой междукатушечные и междуфазные соединения, выполненные гибким проводом.

Станина *11* отлита из чугуна марки СЧ12-28 и имеет на внутренней поверхности ребра для посадки пакета статора. Пространство между стенкой станины и пакетом статора служит для прохода охлаждающего воздуха, который выходит через боковые и нижние отверстия станины в окружающую атмосферу. Таким образом, все четыре отсека между ребрами сообщаются с наружным воздухом. Высота ребер станины определяется не только необходимым сечением каналов для охлаждающего воздуха, но и жесткостью станины, которая необходима для предохранения от проседания листов пакета статора и обеспечения равномерного воздушного зазора между статором и ротором.

Выводные концы обмотки статора *28* пропущены через окно станины и зажаты между деревянными планками *26* и *29*. Шесть выводов дают возможность соединить фазы обмотки в звезду или треугольник в зависимости от напряжения питающей сети. На концах выводов напаяны кабельные наконечники *27*, а на изоляцию выводных проводников надеты металлические бирки с выбитыми обозначениями начал и концов фаз. Для защиты от повреждений выводы закрыты чугунной крышкой *25*, открытой снизу для подвода соединительных проводов от сети.

Ротор *1* набран из нелакированных листов на оправку, опрессован и залит алюминием вместе с лопатками *3* вентилятора. Благодаря этому достигается эффективный отвод тепла от обмотки ротора, так как между крыльями и обмоткой перепад температур ничтожно мал вследствие хорошей теплопроводности алюминия. Таким образом, один и тот же вентилятор обеспечивает охлаждение и ротора, и статора. После заливки ротор напрессовывают на вал *4* и обрабатывают. От проворачивания на валу ротор удерживается шпонкой *2*. Перенесение скоса пазов на статор освобождает от необходимости фрезеровать скошенную шпоночную канавку, которая создает затруднения как в процессе обработки вала, так и при напрессовке пакета ротора на вал.

На шейки вала надеты в нагретом состоянии при температуре 80—90° С подшипники качения: шариковый *20* со стороны, противоположной приводу, и роликовый *6* со стороны привода. Роликовый подшипник при одинаковых габаритных размерах с шариковым имеет больший коэффициент работоспособности, что соответствует распределению нагрузки между опорами вала. Одинаковые размеры подшипников обеспечивают унификацию подшипниковых щитов *9* и внутренних крышек подшипников *5* и *19*. Наружные кольца обоих подшипников зажаты между бортиками крышек без зазоров, так как температурные расширения вала и неточности обработки могут компенсироваться перемещением роликов вдоль внешнего кольца. Крышки подшипников стянуты

болтами *23*, а подшипниковые щиты привернуты к станине болтами *24*. Осевую нагрузку воспринимает шариковый подшипник, поэтому для предохранения от перемещений вдоль вала он заперт пружинным

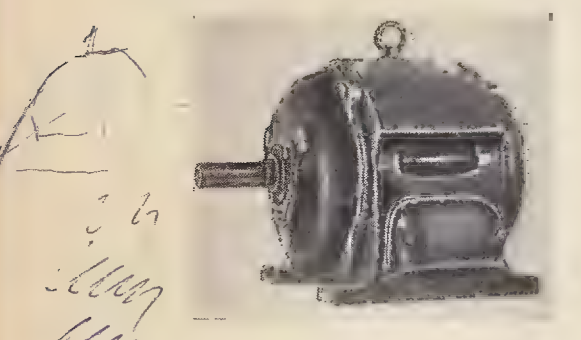


Рис. 9-8а. Внешний вид двигателя А-81.

кольцом *21*, которое на половину толщины входит в канавку вала. Такая конструкция обеспечивает выдерживание веса ротора при вертикальной установке двигателя.

Подшипниковые щиты отлиты из чугуна марки СЧ12-28. Они крепятся к станине восемью болтами, которые попарно расположены в четырех приливах. Для направления воздуха к лопаткам вентилятора служат диффузоры *18*, приклепанные к подшипниковым щитам. Для измерения воздушного зазора в подшипниковых щитах и диффузорах сделаны отверстия для прохода щупа.

Крышки подшипников имеют три разновидности: две одинаковые внутренние крышки *5* и *19*, крышка со стороны выпущенного конца вала *7* и крышка с противоположной стороны *22*. Для уплотнения камер подшипников здесь применены кольцевые улавливающие канавки, по три в каждой крышке, сквозь которые проходит вал. Наличие внутренних крышек подшипников обеспечивает разборку двигателя без снятия подшипников с вала, но зато создает некоторые трудности при сборке двигателя. После надевания на подшипники подшипниковых щитов надо подтянуть крышки *5* и *19* к щитам, ввести их бортики в расточки щитов и окончательно затянуть болты *23*. Обычно перед сборкой двигателя в отверстия крышек *5* и *19* ввертывают по одной шпильке и при надевании щита пропускают их через одно из отверстий в нем. Таким образом, отверстия в крышках ориентируют относительно отверстий в щите. После ввертывания трех болтов *23* шпильку вывертывают и на ее место ставят четвертый болт.

Внешний вид двигателя А-81 показан на рис. 9-8а.

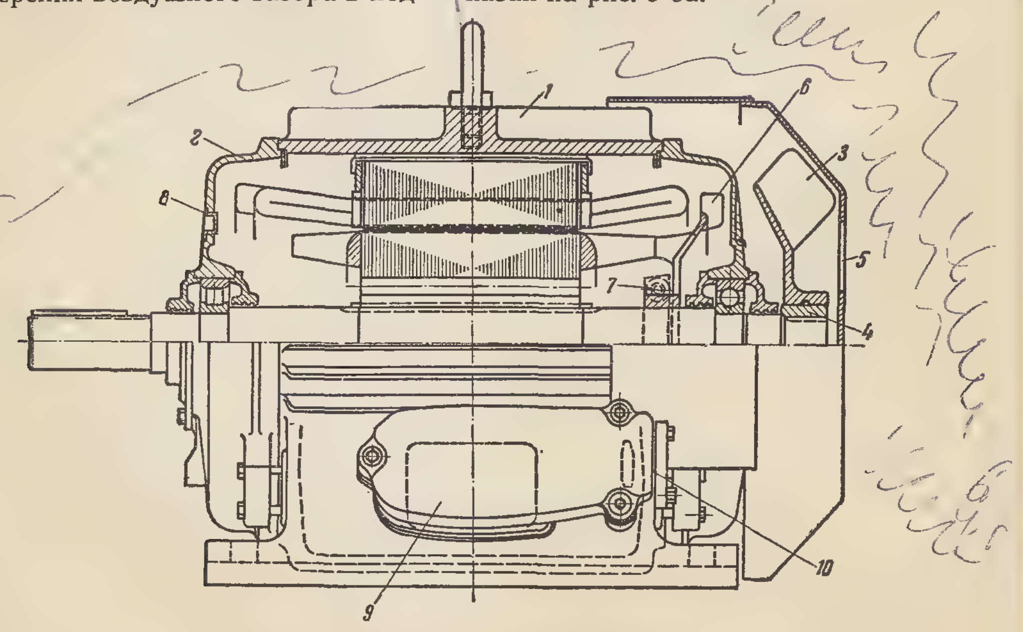


Рис. 9-9. Асинхронный двигатель АО-82.

Конструкция двигателя АО-82. На рис. 9-9 представлена конструкция закрытого обдуваемого двигателя АО-82. В станине *1* и подшипниковых щитах *2* нет отверстий для охлаждающего воздуха; таким образом, внутреннее пространство двигателя полностью отделено от окружающей атмосферы. Внутренняя поверхность станины выполнена в виде сплошной трубы для лучшего теплоотвода от пакета статора к стенке станины. На наружной поверхности станины отлиты продольные ребра для увеличения поверхности охлаждения. Пакет статора выполнен совершенно аналогично пакету статора двигателя А-82 в защищенном исполнении. Для скоб пакета статора в станине отлиты продольные канавки.

Охлаждение наружной поверхности двигателя производится следующим образом. На конце вала со стороны, противоположной приводу, насажен алюминиевый вентилятор *3*. Для надежного скрепления с валом в осевом отверстии вентилятора залита стальная втулка *4*, внутреннее отверстие которой обработано под посадку на вал. Во втулке сделано выступающее кольцо, пересеченное канавками для предохранения алюминиевого вентилятора от перемещения по втулке в осевом и тангенциальном направлениях. Вентилятор закрыт колпаком *5*, состоящим из штампованного днища и согнутого из листовой стали обода, которые скреплены точечной сваркой. В торце днища выштампованы узкие радиальные отверстия для забора воздуха. Колпак крепится четырьмя радиально расположенными болтами к приливам в станине.

Благодаря соответствующим формам крыльев вентилятора и днища колпака воздух поворачивается на 90° и направляется вдоль ребер станины, отводя от них тепло. Делать обод вдоль всей станины нецелесообразно, так как это создавало бы дополнительное сопротивление для воздушного потока и препятствовало бы естественному охлаждению станины при остановке двигателя.

Ротор выполнен аналогично ротору двигателя защищенного исполнения с крыльями на замыкающих кольцах беличьей клетки. Но, вращаясь в замкнутом воздушном пространстве, эти крылья не могут создать циркуляцию воздуха, так как напоры их уравновешиваются. Поэтому на вал надет еще один вентилятор *6*, отлитый из алюминия и укрепленный при помощи разрезного хомута, который стягивается болтом *7*. Действием этого вентилятора нагретый воздух внутри двигателя протягивается через осевые вентиляционные каналы в листах ротора и подается в полость правого подшипникового щита. Для создания непрерывной циркуляции воздуха внутри двигателя в станине сделаны четыре продольных канала, соединяющие правую часть с левой. Таким образом, нагретый воздух внутри двигателя омывает правую часть оболочки, которая снаружи наиболее эффективно охлаждается холодным воздухом, прогоняемым наружным вентилятором *3*. За счет эффективного охлаждения удалось получить одинаковые установочные размеры двигателей защищенного и закрытого исполнений для одинаковых значений мощности и скорости вращения.

Конструкция подшипниковых узлов такая же, как у двигателей в защищенном исполнении. Диффузоры и внутренние приливы для них на подшипниковых щитах отсутствуют. Для измерения воздушного зазора между статором и ротором в щите со стороны привода просверлены отверстия, закрытые штампованными крышками *8*. Коробка выводов *9* имеет закрытую форму, перекрывает окно станины для выводных концов обмотки и имеет горловину с уплотнением *10* для подвода питающих проводов от сети.

Внешний вид двигателя показан на рис. 9-9а.

Конструкция двигателя АК-81. На рис. 9-10 показана конструкция двигателя АК-81 с контактными кольцами. Этот двигатель является модификацией серии короткозамкнутых двигателей. Статор, станина *10* и подшипниковые щиты *14* яв-

ляются взаимозаменяемыми с соответствующим двигателем типа А.

Ротор *2* имеет существенные отличия как от ротора короткозамкнутого двигателя серии А, так и от роторов двигателей с контактными

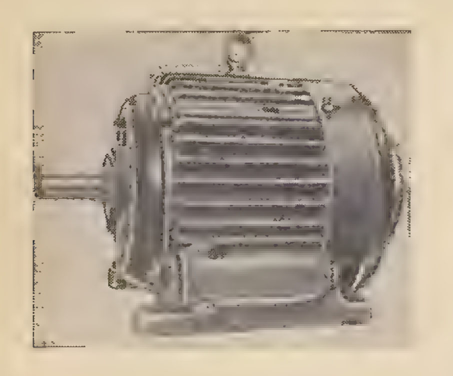


Рис. 9-9а. Внешний вид двигателя АО-82.

кольцами старых серий. Раньше роторы двигателей мощностью 20 *квт* и выше выполняли со стержневыми обмотками волнового типа. В двигателях серии АК роторы имеют петлевые обмотки из многовитковых катушек, намотанных из прямоугольного провода. Катушечная группа из q катушек намотана непрерывным проводом, благодаря чему сокращается число паек и упрощается соединение схемы обмотки. Все проводники обмотки вкладывают в паз в один слой, что обеспечивает хорошую теплоотдачу от проводников к стенкам паза. Широкие лобовые части обмотки ротора играют роль лопастей вентилятора.

Второй конструктивной особенностью ротора является раздельное выполнение нажимных шайб и обмоткодержателей *6*, которые в двигателях старых серий выполнялись как одна деталь. В двигателях серии АК нажимные шайбы ротора стальные и запираются на валу при помощи пружинных стальных колец *5*, вкладываемых в канавки, проточенные в валу. Обмоткодержатели *6*, поддерживающие лобовые части катушек, выполнены в виде легких чугунных отливок, имеющих форму двух колец, соединенных широкими ребрами. Они надеваются на вал свободно перед обматыванием ротора и укрепляются на валу стопорными винтами. Верхнее кольцо изолируют полосками электрокартона и киперной лентой.

К выступам ребер привернуты болтами стальные диски *9* с прорезями для прохода охлаждающего воздуха. К дискам приварены штампованные кольца *7* коробчатого сечения, которые служат для укрепления балансировочных грузов. В двигателях старых серий балансировку

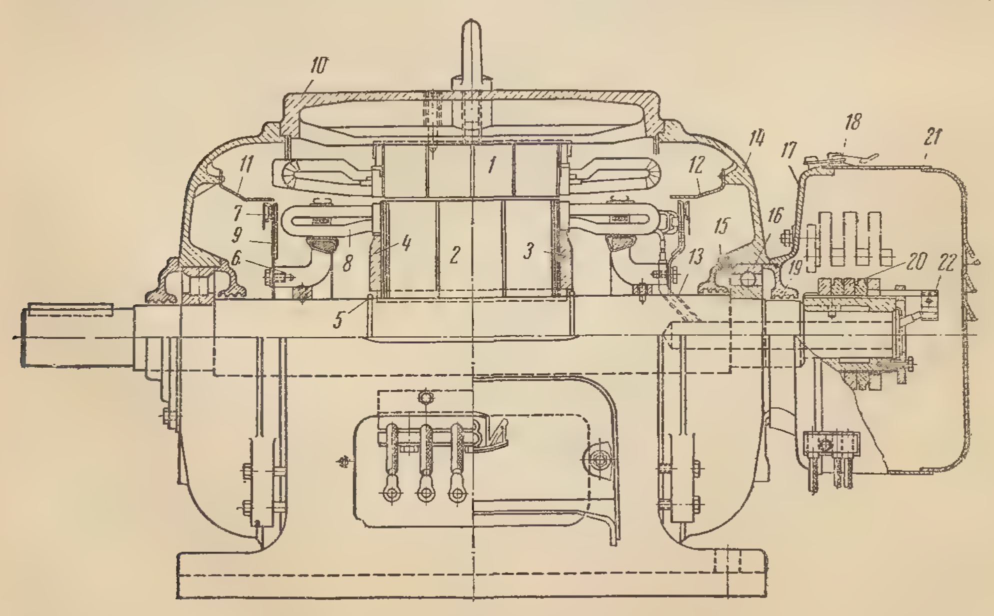


Рис. 9-10. Асинхронный двигатель АК-81.

производили путем напайки припоя на бандажи ротора. Это приводило к растягиванию бандажей центробежными силами грузов и нарушению балансировки, а иногда и к разрыву бандажей. К балансировочным кольцам подходят штампованные из листовой стали диффузоры *11* и *12*, служащие для направления охлаждающего воздуха, который, как и в двигателях типа А, забирается через окна, отлитые в нижней части подшипниковых щитов *14*.

Двигатели типа АК, как и все современные асинхронные двигатели, выполнены с контактными кольцами *20*, насаженными на консольный конец вала, и выводы от обмотки ротора *13* подводятся к кольцам через высверленное в валу отверстие. Такое расположение колец имеет следующие преимущества по сравнению с расположением их внутри двигателя:

1) достигается унификация подшипниковых щитов двигателей с фазным и с короткозамкнутым ротором;

2) обеспечивается доступность контактных колец и щеткодержателей для осмотра и ремонта;

3) щеточная пыль не оседает на обмотках двигателя и не снижает электрических свойств их изоляции.

Поэтому в настоящее время с внутренними контактными кольцами выпускают только двигатели с двумя выпущенными концами вала, например крановые.

Однако эффект от вынесения контактных колец на консоль вала был бы значительно снижен, если при каждой разборке двигателя пришлось бы спрессовывать кольца с вала с отсоединением их от обмотки ротора. Это снижало бы надежность контактов колец с обмоткой и требовало бы проточки колец после каждой сборки двигателя. Поэтому в конструкции двигателей серии АК предусмотрена разборка без снятия контактных колец с вала. Это достигается за счет того, что диаметр отверстия в подшипниковом щите *14* больше наружного диаметра колец *20*, а наружная крышка шарикоподшипника *19* выполнена необычной конструкции. Она не имеет выступающего борта и прижимается к шарикоподшипнику *16* диском *17*, на котором укреплена ось щеткодержателей. Этот диск укреплен болтами, проходящими через отверстия в подшипниковом щите и ввернутыми во внутреннюю крышку подшипника *15*.

Контактные кольца разделены изоляционными перегородками и напрессованы на чугунную втулку, изолированную полосками электрокартона. При сборке втулку насаживают на консоль вала. Выводы от контактных колец выполнены медными шинами, приваренными к кольцам и проходящими через канавки, продолбленные в соседних кольцах. Выводы от обмотки соединены с шинами при помощи наконечников *22*, которые пропаивают.

Контактные кольца и щеткодержатели закрыты штампованным колпаком *21*, в торцевой части которого прорезаны жалюзи для охлаждающего воздуха. Колпак снимается после отстегивания замков *18* эксцентрикового типа.

Единая серия двигателей А2 и АО2. Внедрение единой серии двигателей А и АО дало народному хозяйству СССР огромную экономию как в области производства их, так и в эксплуатации. Однако техника непрерывно развивается и то, что было прогрессивным и передовым при проектировании серии А и АО в 1946 г., уже не удовлетворяет современным требованиям. Последние достижения в области изоляционных материалов, обмоточных проводов, технологии производства, а также согласование технических условий с материалами международных организаций МЭК (Международная электротехническая комиссия) и СЭВ (Совет экономической взаимопомощи) потребовали разработки новой серии асинхронных двигателей в диапазоне мощностей 0,6—100 *квт*, проект которой был утвержден в 1958 г. После внедрения новой серии двигатели А и АО были сняты с производства.

Серия спроектирована на девяти габаритах и имеет шкалу мощностей, состоящую из 18 ступеней вместо 14 в серии А и АО. Двигатели новой серии имеют следующие

преимущества по сравнению с двигателями серии А и АО:

твердая шкала мощностей с коэффициентом нарастания 1,5—1,25 для всех скоростей вращения;

повышенные энергетические показатели;

меньший вес на единицу мощности;

меньшие габаритные размеры;

меньшая скорость нарастания температуры обмоток статора при пуске;

высокая эксплуатационная надежность вследствие улучшения конструкции обмоток и применения высокопрочных изоляционных материалов;

эксплуатационные удобства, заключающиеся в большей унификации узлов и деталей, что облегчает ремонт электродвигателей.

Буквенные обозначения двигателей в новой серии остаются прежними, как и у серии А и АО, но с добавлением цифры 2, например: А2 — защищенное и АО2 — закрытое обдуваемое исполнения. Электродвигатели первых пяти габаритов выпускаются только в закрытом обдуваемом исполнении.

Защищенные электродвигатели (А2, АК2) имеют следующие конструктивные исполнения:

горизонтальное со станиной на лапах (исполнение М1);

горизонтальное со станиной на лапах и фланцем на подшипниковом щите (исполнение М2).

Закрытые обдуваемые электродвигатели, кроме исполнений М1 и М2, имеют еще вертикальное исполнение со станиной без лап и фланцем.

Конструкция двигателя А2-81. На рис. 9-11 показана конструкция двигателя А2-81 в защищенном исполнении. Двигатель имеет двустороннюю радиальную вентиляцию, как и двигатель А-81 (см. рис. 9-8), однако она имеет конструктивные усовершенствования. Забор охлаждающего воздуха производится через раструбы *8* в нижней части подшипниковых щитов *2*, а выброс воздуха — через боковые окна *7* в нижней части станины. Для этого станина выполняется удлиненной формы, что придает двигателю бóльшую жесткость. Увеличенные сечения и симметричное расположение отверстий в станине способствуют более интенсивному охлаждению

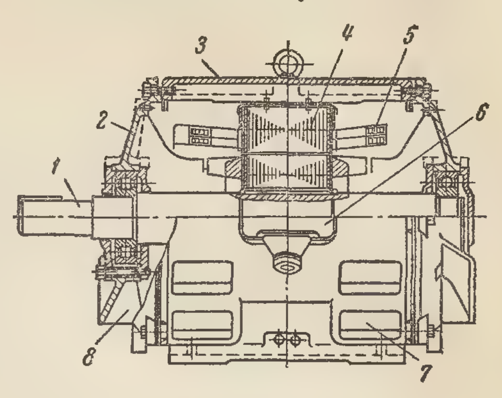


Рис. 9-11. Асинхронный двигатель А2-81.

активных частей двигателя. В то же время расположение отверстий в щитах и станине защищает вращающиеся и токоведущие части от случайного прикосновения и попадания внутрь двигателя посторонних предметов и капель воды, падающих отвесно и под углом 45° к вертикали.

Станина *3*, подшипниковые щиты *2* и крышки подшипников отлиты из чугуна. Вал *1* выточен из стали марки Ст.5.

Сердечник статора *4* собран из штампованных листов электротехнической стали марки Э11 толщиной 0,5 *мм*. Перед шихтовкой листы статора покрыты с обеих сторон лаковой пленкой. Лакированные листы набирают на оправку, спрессовывают и запирают продольными скобами. После обмотки и пропитки сердечник впрессовывают в станину, в которой он удерживается от сдвига и проворачивания двумя шпильками. Обмотка статора *5* состоит из мягких секций, намотанных круглым проводом. Изоляция обмотки выполнена по классу нагревостойкости Е.

Сердечник ротора собран из листов, полученных из внутренней вырубки листов статора. Круглые вентиляционные отверстия в листах ротора создают осевые каналы для охлаждающего воздуха. После сборки и прессовки ротор заливают

алюминием вместе с вентиляционными лопатками. Ротор напрессован на вал *1* и от проворачивания удерживается шпонкой, а от осевых перемещений — двумя кольцами из

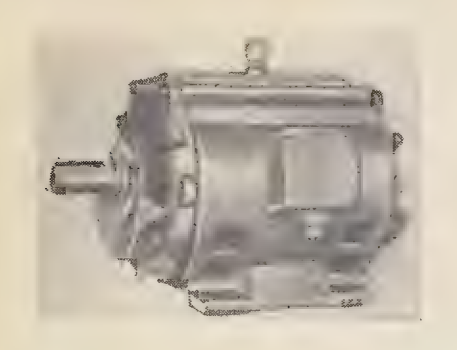


Рис. 9-11а. Внешний вид двигателя А2-81.

круглой проволоки, вложенными в канавки вала.

Обмотка статора выведена к шести зажимам, укрепленным на панели и закрытым в коробке *6* зажимов. Подвод сетевых проводов осуществляется через штуцер коробки.

На рис. 9-11а показан внешний вид электродвигателя А2-81.

Конструкция двигателя АО2-92. На рис. 9-12 представлена конструкция закрытого обдуваемого двигателя АО2-92. Сердечник *12* статора собран на оправку, спрессован и скреплен скобами. Он впрессован в чугунную станину *10* и защищен от перемещений двумя винтами. В пазы статора вложены катушки *11* двухслойной всыпной обмотки. Выводы обмотки подведены к контактным винтам, впрессованным в пластмассовую дощечку и помещенным в коробке на боковой стороне станины, справа, если смотреть со стороны выпущенного конца вала. Обмотка статора выполнена по классу нагревостойкости F.

Сердечник *14* ротора залит алюминием и сидит на валу *3* на шпонке. Для предохранения от перемещений вдоль вала сердечник ротора защищен двумя кольцами *7*, согнутыми из стальной проволоки и на половину толщины углубленными в канавки, проточенные в валу. На замыкающих кольцах *15* между крыльями отлито по два цилиндрических стерженька. При балансировке на них надевают балансировочные грузики и концы стерженьков расклепывают. Поэтому не приходится сверлить и нарезать отверстия для болтов, крепящих балансировочные грузики.

На шейки вала надеты роликоподшипник *4* № 2317-к со стороны привода и шарикоподшипник *21*

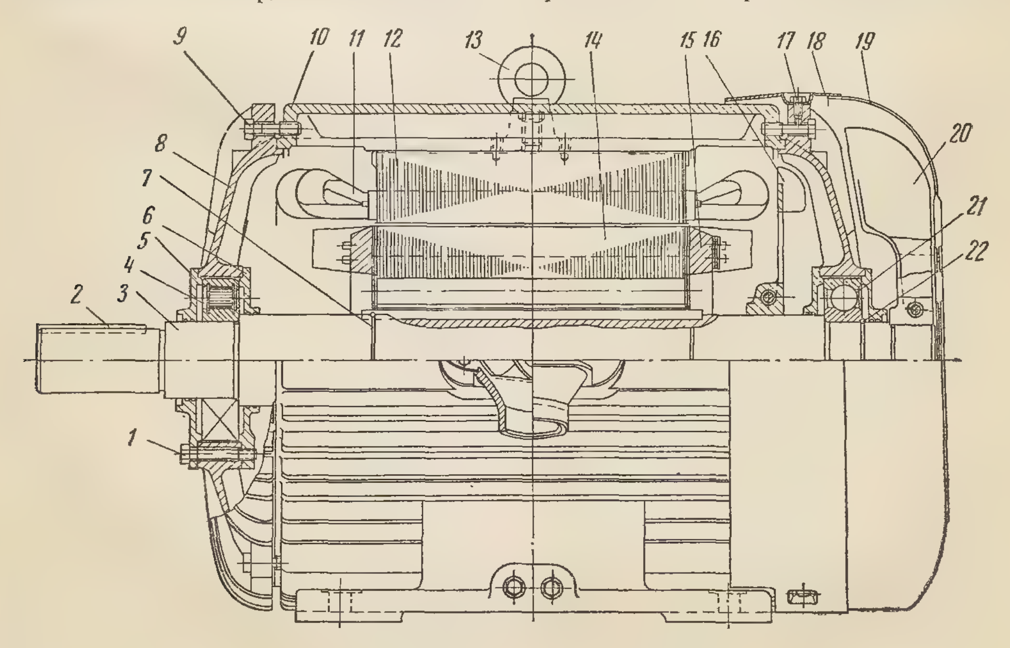


Рис. 9-12. Асинхронный двигатель АО2-92.

№ 317 со стороны вентилятора. В двигателях вертикального исполнения оба подшипника шариковые. Наружные размеры подшипников одинаковые, благодаря чему достигается унификация подшипниковых щитов *8* и крышек *5* и *6* подшипника с обеих сторон ротора. Подшипниковые щиты прикреплены к станине *10* болтами *9*, которые расположены в ушках щитов. Крышки подшипников скреплены болтами *1*.

На конец вала надет алюминиевый вентилятор *20*, имеющий разрезную ступицу, стягиваемую болтом. Это обеспечивает надежную посадку вентилятора на вал даже при сработке посадочных поверхностей. Вентилятор закрыт колпаком *19* с отверстиями в центре для забора воздуха. К колпаку приварен точками ободок *18*, который болтами *17* прикреплен к ушкам подшипникового щита. Коническая поверхность ободка способствует лучшему направлению струи воздуха, омывающего наружную поверхность двигателя. Для увеличения поверхности охлаждения наружная поверхность станины имеет ребра.

Вентилятор *16* сидит на валу внутри двигателя. Он предназначен для перемешивания воздуха внутри станины. Благодаря этому исключаются местные перегревы внутренних частей двигателя. Вентилятор *16* также имеет разрезную ступицу, стянутую болтом.

На боковой поверхности лап отлиты площадки и в них просверлены и нарезаны отверстия для болтов, к которым крепят провод заземления. Для подъема двигателя при монтаже в верхнюю часть станины ввернуто подъемное кольцо *13*.

Шарикоподшипник *21*, на который передается осевая нагрузка, предохранен от перемещений вдоль вала пружинным кольцом *22*, углубленным на половину его толщины в канавку, проточенную на валу. На выступающем конце вала профрезерована шпоночная канавка, в которую вставлена шпонка *2*.

Конструкция двигателя АО2-32. Двигатели меньших габаритов производятся в массовых количествах, поэтому в конструкцию их внесены максимально возможные упрощения. На рис. 9-13 показан двигатель закрытого обдуваемого исполнения типа АО2-32. В этих двигателях применены шарикоподшипники *3* с защитной шайбой, обращенной внутрь двигателя. Благодаря этому не нужны внутренние крышки подшипников. Наружные крышки объединены в одно целое с подшипниковыми щитами *4*. Для ограничения осевого разбега ротора между шарикоподшипниками *3* и щитами *4* вставлены пружинные шайбы *2*. Таким образом, в конструкции подшипникового узла нет ни одного болта. Это чрезвычайно облегчает процесс сборки двигателя, которая может быть автоматизирована.

Подшипниковые щиты *4* центрируются в заточке станины *9* внутренними замками и прикрепляются к ней тремя болтами *5*, расположенными в ушках на ободе щита.

Пакет статора скреплен скобами и зажат между двумя штампованными нажимными шайбами *6*. Наружная поверхность станины покрыта продольными ребрами для увеличения поверхности охлаждения. В верхней точке окружности станины ввернуто подъемное кольцо *8*. Наружная поверхность станины обдувается вентилятором *14*, насаженным на конец вала *1*. Вентилятор закрыт колпаком *13*, в торце которого прорезаны щели *15* для забора воздуха. Колпак крепят болтами *12* к ушкам подшипникового щита.

В пазы статора вложены катушки *11* однослойной обмотки, выводные концы которой подведены к зажимам, помещенным в коробке *16*. Шесть выводов обеспечивают возможность соединения трехфазной обмотки в звезду или треугольник в зависимости от напряжения сети. Ротор *10* залит алюминием и напрессован на рифленую среднюю часть вала.

в) **Асинхронные двигатели мощностью от 100 до 1 000** *квт*. В этом диапазоне мощностей строилось несколько серий асинхронных двигателей. Двигатели этих серий в последние годы подверглись модификации конструкций, которая в ос-

новном выразилась в переводе двигателей на подшипники качения, что значительно повысило эксплуатационную надежность двигателей. Кроме того, была проведена рационализация конструкций станин и подшипниковых щитов в направлении снижения веса и упрощения формовки и механической обработки, что дало большой экономический эффект. Разрозненные серии двигателей заменены двигателями

ной 55 *мм*, а средние шириной по 45 *мм*. Для сердечников применена сталь марки Э22 с удельными потерями 2,5 *вт/кг* вместо стали Э11 с удельными потерями 3,3 *вт/кг*.

3. Для катушек статора двигателей на 3 000 и 6 000 *в* вместо провода марки ПБД с дополнительной витковой изоляцией в виде микаленты применены провода марок ППТБО с изоляцией из триацетатной пленки и одинарной обмотки

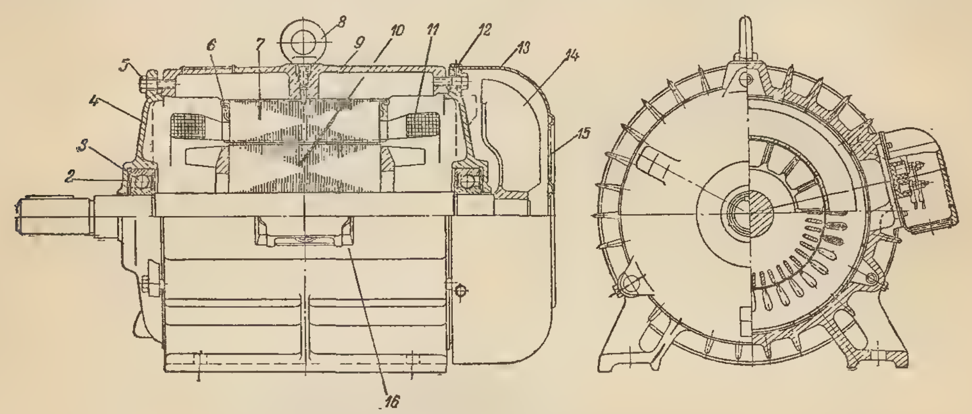


Рис. 9-13. Асинхронный двигатель АО2-32.

единой серии, которая является продолжением серии двигателей от 0,6 до 100 *квт* и охватывает габариты 10, 11, 12 и 13. В основу проекта единой серии положены следующие принципы.

1. Все двигатели с фазным ротором выполняются с постоянно налегающими щетками и без приспособления для подъема щеток и замыкания колец накоротко. Это объясняется тем, что пользование приспособлением несовместимо с дистанционным управлением электродвигателями, которое в современном электроприводе является основным. Для снижения потерь в щеточном контакте применены медные кольца вместо стальных и щетки марки МГ4, имеющие пониженные потери по сравнению со щетками марки МГ2.

2. Изменена система пакетирования сердечников статора и ротора. Раньше все пакеты делали одинаковой ширины. В единой серии крайние пакеты, имеющие лучшие условия охлаждения, делают шири-

хлопчатобумажной пряжей и ППЛБО с изоляцией в виде лаковой пленки и одинарной обмотки хлопчатобумажной пряжей.

4. Для двигателей всех габаритов применены подшипники качения.

5. Освоена технология сборки сердечников на внутреннюю оправку для статоров габаритов *10* и *11*, что дало возможность отменить обработку внутренней поверхности статора и снизить потери в стали.

6. Внешние диаметры статоров выбраны с учетом раскроя листов электротехнической стали на полосы без немерных остатков.

7. Разработана новая конструкция контактных колец без втулки с фланцевым креплением к валу (см. рис. 9-15).

8. Впервые в технике электромашиностроения применена заливка алюминием роторов с радиальными вентиляционными каналами.

Конструкция двигателя А-104 *в защищенном исполнении.* Электродвигатели единой серии изготовля-

ются в защищенном и продуваемом исполнениях. Электродвигатели в защищенном исполнении (рис. 9-14) имеют двустороннюю симметричную радиальную вентиляцию. Воздух забирается через отверстия в нижней части обоих щитов, проходит частично через лобовые части обмотки статора, частично по радиальным каналам ротора и статора и выбрасывается через окна в станине. Напор создается крыльями ротора.

Сердечники первых двух длин строятся без вентиляционных радиальных каналов, а двигатели 3-й и 4-й длин имеют сердечники, разделенные на пакеты радиальными каналами. Каналы образуются при помощи распорок, приваренных к крайнему листу, ограничивающему радиальный канал.

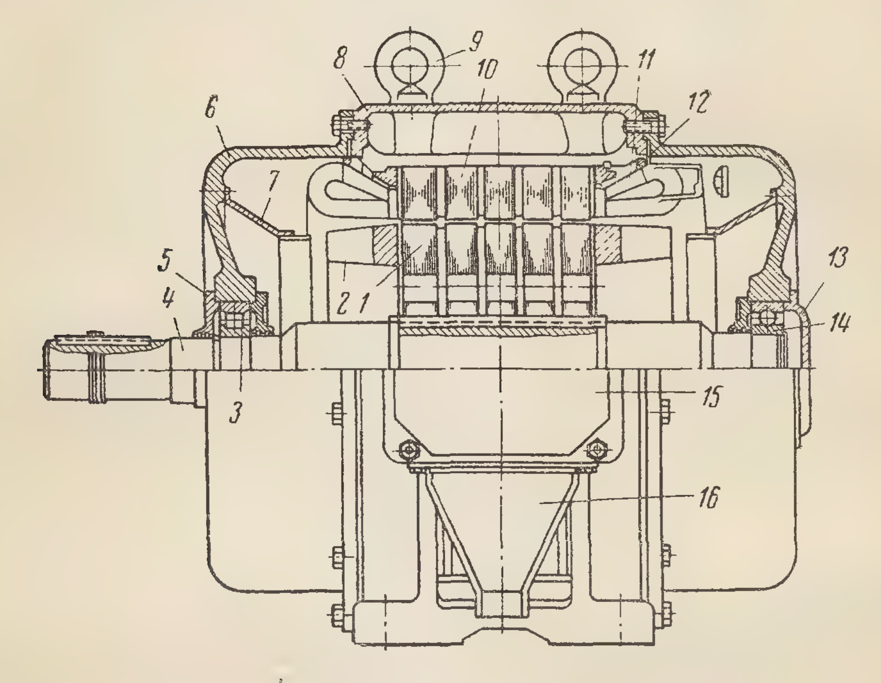


Рис. 9-14. Асинхронный двигатель А-104.

У двигателей в продуваемом исполнении на щитах предусмотрены патрубки для присоединения воздуховодящих труб от системы независимого охлаждения. Выброс воздуха производится через трубу, которая крепится к нижней плоскости станины. Осуществление продуваемой вентиляции за счет напора вентиляторов электродвигателя возможно лишь при падении напора в трубопроводах, не превышающем 3—4 *мм* водяного столба. При бòльших падениях напора необходимо принудительное нагнетание воздуха в двигатель.

Двигатели габаритов 10 и 11 имеют четыре длины сердечников.

Сердечник ротора *1* насажен на вал *4*. Круглые осевые вентиляционные каналы, выштампованные в листах ротора, обеспечивают доступ к радиальным каналам воздуха, который направляется диффузорами *7*. Обмотка ротора залита в пазы расплавленным алюминием вместе с замыкающими кольцами и крыльями вентилятора *2*. На шейки вала насажены шариковый *14* и роликовый *3* подшипники, запертые от перемещения по валу пружинными кольцами. Наружные кольца подшипников вставлены в отверстия подшипниковых щитов *6*. Щиты центрируются по отношению к станине *8* на замках. В противоположность конструкции двигателей мощностью до 100 *квт* здесь применены наружные замки, при которых щи-

ты надевают на заточки станины. Наружные замки применяют в крупных машинах в целях упрощения обработки станины. В приливы станины ввернуты два подъемных кольца *9*. Сердечник статора *10* опирается на ребра станины и имеет столько же радиальных каналов, сколько и ротор. Лобовые части *11* обмотки статора привязаны шнуром к бандажным кольцам *12*. Конструкция двигателя симметрична относительно вертикальной оси, за исключением крышек подшипников *5* и *13*. Выводы обмотки статора помещены в коробку *15*, из которой выходят сетевые кабели через штуцер *16*.

Конструкция двигателя АК-104. На рис. 9-15 показана конструкция асинхронного двигателя 10-го габарита с фазным ротором и контактными кольцами. В чугунную станину *10* впрессованы пакеты статора *11*, собранные из листов электротехнической стали. Между пакетами при помощи распорок образованы вентиляционные каналы *12*, через которые циркулирует воздух, охлаждающий активные части двигателя. Воздух засасывается вентиляционными каналами ротора, которые при вращении его действуют как вентиляторы. В листах статора проштампованы пазы; в них вложены катушки *8* из прямоугольного провода.

Выводы обмотки статора подведены к контактам, помещенным в коробку *22*, закрытую крышкой. Для подъема двигателя в приливы станины ввернуты два подъемных кольца *9*. К торцам статора болтами *13* привинчены подшипниковые щиты *4*, отлитые из чугуна. Они центрируются относительно станины на кольцевых заточках, что обеспечивает равномерность воздушного зазора по окружности ротора.

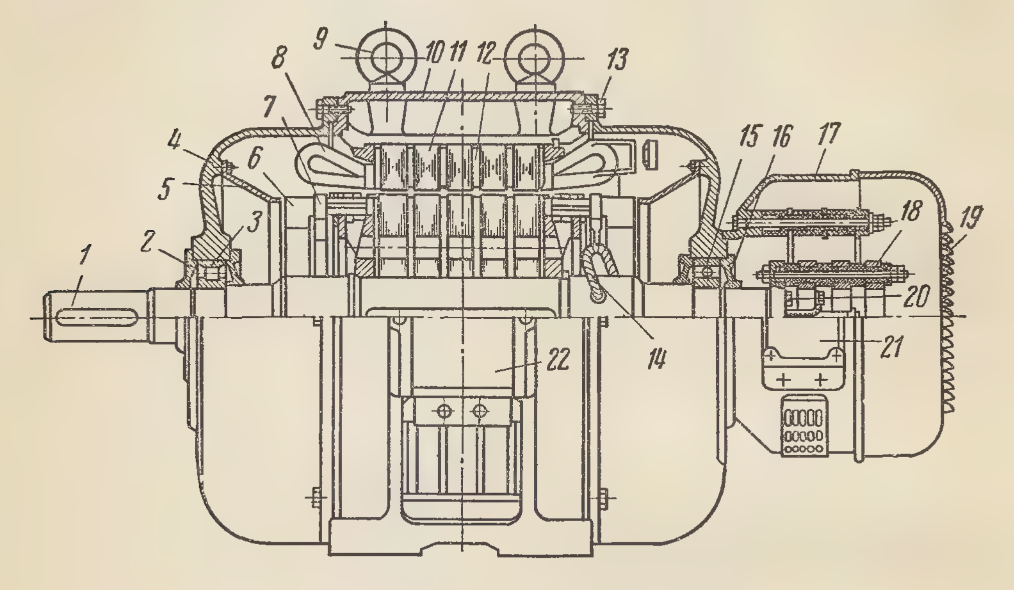


Рис. 9-15. Асинхронный двигатель АК-104.

Изнутри к подшипниковым щитам привинчены диффузоры *5* для направления охлаждающего воздуха. Воздух забирается через отверстия в торцах подшипниковых щитов и крыльями *6* ротора прогоняется между лобовыми частями обмотки статора. Выбрасывается воздух через отверстия на боковых сторонах станины. Кроме того, охлаждающий воздух проходит через выштампованные в листах ротора отверстия к радиальным вентиляционным каналам ротора и статора. Такая система вентиляции носит название радиальной двусторонней.

В отверстия подшипниковых щитов вставлены наружные кольца подшипников качения: шариково-

го *15* со стороны контактных колец и роликового *3* со стороны выступающего конца вала *1*. Подшипники изнутри и снаружи закрыты чугунными крышками *2* и *16* для защиты от засорения и предотвращения вытекания смазки из камеры подшипника.

Листы ротора выштампованы из вырубок листов статора. Сердечник ротора разделен на такое же число пакетов, как и сердечник статора. Он зажат между двумя нажимными шайбами, из которых левая упирается в бортик вала *1*, а правая запирается пружинным кольцом. Оно врезано в канавку, проточенную на валу. В закрытые пазы ротора вставлены стержни обмотки с гильзовой изоляцией. Вторые концы стержней выгнуты после вставки стержней в пазы. Стержни верхнего и нижнего слоев обмотки соединены хомутиками *7*, которые пропаяны. Лобовые части стержней опираются на обмоткодержатели, отлитые вместе с нажимными шайбами сердечника ротора.

Для предотвращения выгибания стержней под действием центробежных сил на их лобовые части намотаны проволочные бандажи из стальной проволоки. Витки бандажей скреплены скобочками из жести и пропаяны по всей окружности ротора. Бандажи не должны выступать за окружность ротора, иначе ротор нельзя будет вставить в расточку статора. Для этого лобовые части стержней в месте выхода из пазов выгибают.

Контактные кольца *18* собраны на изоляционных втулках и прикреплены болтами *20* к торцу вала. Расположение контактных колец за пределами внутреннего пространства двигателя предохраняет машину от засорения угольной пылью, образующейся в результате износа щеток, и облегчает доступность к контактным кольцам и щеткодержателям без разборки машины. Соединение колец с обмоткой ротора осуществляется гибкими кабелями *14*, проложенными через отверстие в валу.

Над контактными кольцами на изолированный болт, закрепленный в коробке *17*, надеты щеткодержатели со щетками. Выводы от щеток подведены к коробке *21* на подшипниковом щите. Они соединяют цепь обмотки ротора с пусковыми и регулировочными сопротивлениями. Контактные кольца и щеткодержатели закрыты коробкой *17*, торец которой защищен колпаком *19* с отверстиями для воздуха, охлаждающего контактные кольца.

г) Асинхронные двигатели мощностью свыше 1 000 *квт*. Эти двигатели изготовляются с сегментированными сердечниками статора и ротора и сварными станинами. По способу защиты от влияния окружающей среды — это открытые или закрытые продуваемые машины, а по конструктивному выполнению — машины с двумя стояковыми подшипниками на фундаментной плите.

На рис. 9-16 представлена конструкция двигателя 19-го габарита в открытом исполнении. Станина двигателя сварная неразъемная и состоит из трех колец *1*, сваренных с наружным ободом *2*. Между кольцами вварены продольные ребра *3*, на которых центрируются сегменты статора *9*. Каждый сегмент имеет два паза (см. рис. 9-69), которыми он надевается на шпильки *10*, пропущенные вдоль сердечника. Для предохранения шпилек от прогиба они поддерживаются четырьмя планками *11*, расположенными в радиальных вентиляционных каналах статора. Лобовые части обмотки статора привязаны бандажным шнуром к стальному кольцу *12*, которое опирается на шпильки, ввернутые в кольца станины. Для защиты обмотки от попадания в нее посторонних предметов она закрыта решетчатым кожухом *13*, который крепится на рамке из угловой стали, привернутой к кольцу станины.

Вал двигателя вращается в двух подшипниках скользящего трения, покоящихся на литых чугунных стойках *4*. Подшипники разъемного типа с двумя смазочными кольцами и вкладышами *14*, залитыми баббитом. Вкладыши зажимаются в головках подшипников за узкий поясок *15* в средней части подшип-

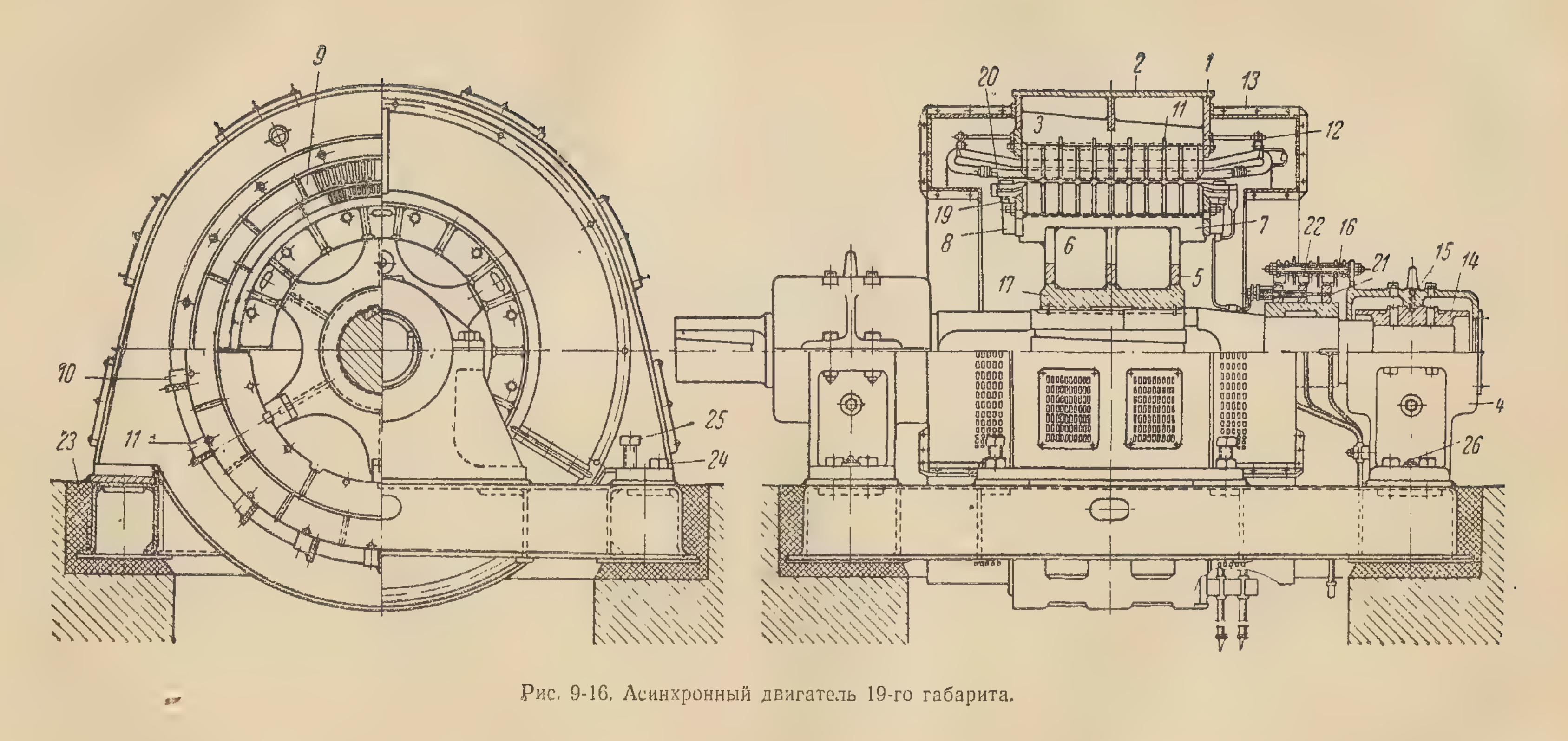


Рис. 9-16. Асинхронный двигатель 19-го габарита.

ника, что позволяет вкладышам самоустанавливаться по оси вала. Таким образом, небольшие перекосы при сборке не влияют на работу подшипника. В крышке правого подшипника отлиты приливы для укрепления осей щеткодержателей *16*.

В середине вала на тангенциальные шпонки напрессована массивная стальная втулка *17* с тремя кольцевыми выступами. К этим выступам приварены диски *5* из толстой листовой стали, которые служат опорой для сердечника ротора. Между дисками вварены радиальные ребра *6*, на концах которых приварены продольные планки *7* со шпоночными канавками. На эти шпонки собираются сегменты ротора *18*. Для удержания сегментов от перемещений под действием центробежной силы они надеваются на шпильки, пропущенные в отверстия нажимных шайб *8*. Последние центрируются на проточенных бобышках, приваренных к крайним дискам крестовины ротора. К нажимным шайбам приварены обмоткодержатели *19*, состоящие из колец, согнутых из листовой стали. Обмотка ротора *20* стержневого типа. Роторные стержни в пазах закреплены текстолитовыми клиньями, а на лобовых частях — проволочными бандажами. Стержни обмотки изолированы микафолием. Концы стержней верхнего и нижнего рядов соединены с помощью хомутиков и пропаяны.

Выводы от обмотки ротора закреплены на валу скобочками и подводятся к контактным кольцам *21*, насаженным на вал у правого подшипника. Контактные кольца стальные насажены в горячем состоянии на массивную втулку, изолированную миканитом. В кольца ввернуты контактные шпильки, которые от других колец изолированы трубками из бакелизированной бумаги. Соединение выводов обмотки ротора со шпильками контактных колец производится при помощи гаек. Щеткодержатели *22* отлиты под давлением из латуни и привернуты болтами к траверсам кольцевого типа. Траверсы крепятся на изолированных шпильках *16*, пропущенных через отверстия в крышке подшипника.

Фундаментная плита *23* выполнена из штампованных балок специального профиля, которые обеспечивают необходимую жесткость плиты при небольшом весе. Плита заливается цементным раствором в бетонном фундаменте. Для уменьшения общей высоты двигателя

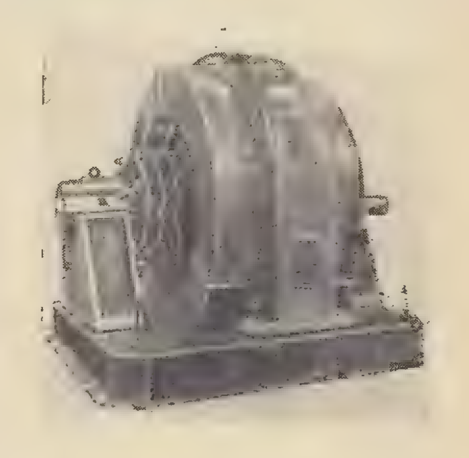


Рис. 9-16а. Внешний вид асинхронного двигателя 19-го габарита.

нижняя часть станины утоплена в отверстии фундаментной плиты. В лапах двигателя, кроме крепящих болтов *24*, ввернуты отжимные болты *25*, которые действуют как домкраты и позволяют регулировать воздушный зазор между статором и ротором. После окончательной регулировки положения статора и стояковых подшипников в фундаментной плите в лапах станины и стояковых подшипников засверливают конические отверстия и забивают в них штифты *26*. Благодаря этому при повторной сборке отпадает необходимость регулировать воздушный зазор, так как станина и стойки подшипников по установочным штифтам снова встанут на свои места.

При разработке единой серии асинхронных двигателей мощностью свыше 1 000 *квт*, которые изготовляются методами мелкосерийного производства, разработаны были нормализованные узлы (подшипники, контактные кольца, статоры, роторы), что позволило значительно уни-

фицировать детали, комбинируя конструкции из нормализованных узлов. На рис. 9-16а показан внешний вид двигателя.

9-6. КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины охватывают огромный диапазон размеров, мощностей, скоростей вращения, частот и напряжений. Поэтому конструкции их чрезвычайно разнообразны. Основное разделение конструкций синхронных машин на явнополюсные и неявнополюсные определяется скоростями вращения. Явнополюсные машины охватывают широкий диапазон скоростей вращения от нескольких десятков до 1 500 *об/мин*; неявнополюсные машины изготовляются почти исключительно на 3 000 *об/мин*.

Синхронные машины выпускаются в качестве генераторов, электродвигателей и компенсаторов в горизонтальном и вертикальном исполнениях с различными системами возбуждения и охлаждения. Здесь рассмотрены лишь типовые конструкции следующих синхронных машин:

а) явнополюсные синхронные машины общего применения;

б) гидрогенераторы;

в) турбогенераторы;

г) синхронные компенсаторы;

а) **Явнополюсные синхронные машины общего применения.** Явнополюсные синхронные машины мощностью до 100 *квт* получили применение в качестве электродвигателей в целях повышения коэффициента мощности в сетях, а также в качестве генераторов для передвижных электростанций.

На рис. 9-17 показана конструкция синхронной машины серии СГ. Машины выпускаются мощностью 15—60 *квт*. На вал *1* ротора напрессована втулка *2*, к которой при помощи винтов привинчены собранные из штампованных листов полюсы *3* с надетыми на них катушками. Ротор вращается на подшипниках качения, из которых подшипник со стороны возбудителя *4* — шариковый, а со стороны привода *5* — роликовый. На консольный конец вала насажен якорь возбудителя *6*. Постоянный ток снимается с коллектора возбудителя щетками и передается по изолированному медному проводу на щетки контактных колец *7*, от которых он поступает в катушки ротора машины.

Наружное кольцо шарикоподшипника, заключенное в капсюль, вставлено в отверстие переднего подшипникового щита *12*, а роликового подшипника — в капсюль заднего подшипникового щита *15*.

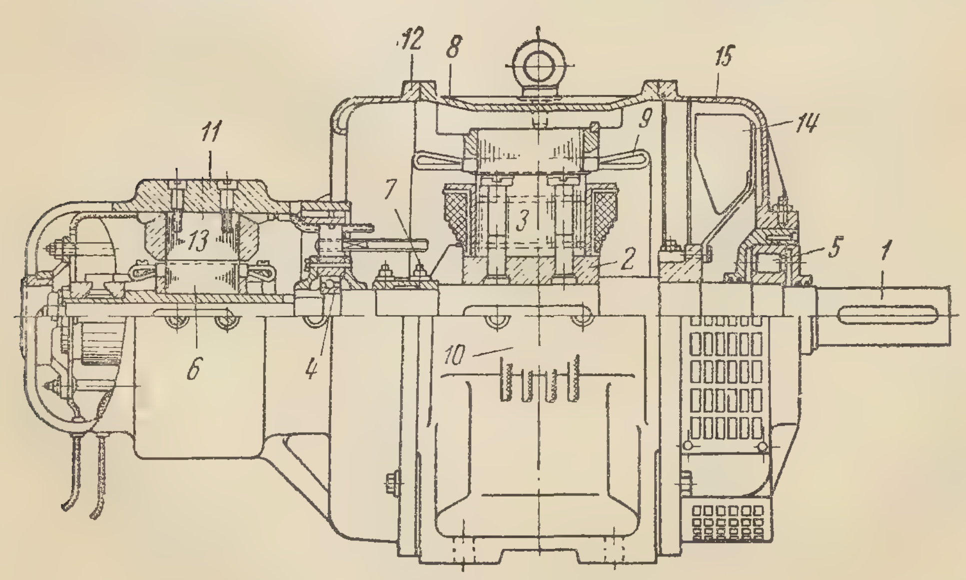


Рис. 9-17. Синхронная машина СГ.

При проектировании синхронной машины необходимо предусмотреть возможность разборки и сборки ее без снятия якоря возбудителя с вала. Это достигается за счет того, что шарикоподшипник *4* заключен в специальный капсюль, диаметр которого больше диаметра якоря возбудителя. Таким образом, при сборке и разборке передний подшипниковый щит свободно снимается через якорь, а капсюль с подшипником остаются на валу. К снятию якоря с вала приходится прибегать только при замене шарикоподшипника, которая производится редко.

Станина статора *8* отлита из чугуна. На внутренней ее поверхности отлиты ребра, на которых центрируются листы статора. В пазах статора уложена обмотка *9*, концы которой выведены на доску зажимов, закрытую коробкой. Станина возбудителя *11* привернута к переднему подшипниковому щиту. К ней привернуты болтами полюсы *13* с надетыми на них катушками возбуждения. Для охлаждения машины на вал насажена втулка, к которой привернут вентилятор *14*, состоящий из штампованной листовой чашки с приклепанными к ней лопатками. Охлаждающий воздух забирается через возбудитель и отверстия в торце переднего подшипникового щита и выбрасывается через сетки, закрывающие окна заднего подшипникового щита. Генератор соединен с механическим двигателем с помощью муфты или ременной передачи.

Сложность устройства и обслуживания синхронной машины определяется наличием у нее возбудителя. Избавиться от возбудителя удалось путем применения легких и надежных селеновых выпрямителей, выпрямляющих переменный ток статора. Таким образом, был получен синхронный трехфазный генератор с самовозбуждением типа ЕСС (единая серия с самовозбуждением через селеновые выпрямители).

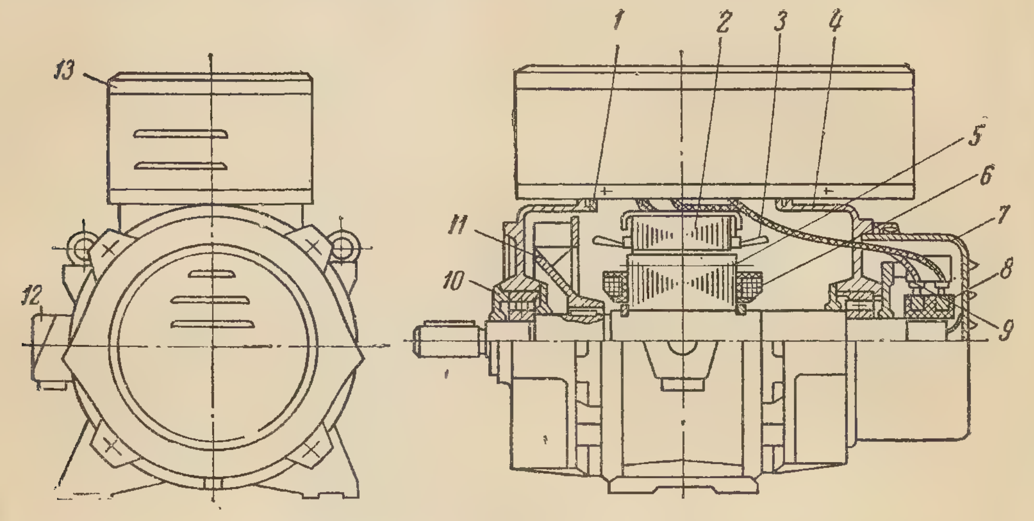


Рис. 9-18. Синхронный генератор ЕСС.

Конструкция генератора типа ЕСС показана на рис. 9-18. Такие генераторы строятся в диапазоне мощностей 5—75 *квт* при скорости вращения 1 500 *об/мин* на напряжения 400 и 230 *в*. Статор *2* генератора с обмоткой *3* запрессован в станину *1*, отлитую из чугуна. К торцам станины прикреплены два симметричных подшипниковых щита *4*. В расточки щитов вставлены подшипники качения *10*: роликовый — со стороны привода и шариковый — со стороны контактных колец.

Сердечник ротора собран из листов электротехнической стали с использованием внутренних кружков, остающихся от штамповки листов статора. Лист ротора представляет

собой четырехконечную звездочку. При сборке сердечника ротора чередуются пакеты листов с высокими и низкими выступами. После надевания на полюсы катушек возбуждения в длинных выступах закрепляются полюсные наконечники. Такая конструкция позволила использовать для сердечника ротора отходы от штамповки листов статора, а также избавиться от крепления полюсов винтами, которое являлось слабым местом в конструкции малых синхронных машин.

В верхней части станины имеется окно, над которым устанавливается коробка *13*, заключающая в себе автоматический регулятор напряжения. В этой же коробке помещаются и селеновые выпрямители. Ток от регулятора поступает в обмотку возбуждения через гибкие кабели, щетки и контактные кольца *8*, закрытые кожухом *7*. Контактные кольца изготовлены из латуни и вместе со стальной втулкой запрессованы в пластмассу. Щеткодержатели укреплены на траверсах, привернутых к подшипниковому щиту.

Вентиляция генератора аксиальная, вытяжная. Вентилятор *11*, насаженный на вал генератора, забирает воздух со стороны контактных колец и выбрасывает его со стороны привода. Часть воздуха проходит через коробку *13* и охлаждает селеновые выпрямители. Коробка выводов *12* расположена на боковой стороне станины. Внутри коробки находятся выводные концы статорной обмотки и обмотки управления.

Обмотка ротора *6* состоит из четырех соединенных последовательно катушек, намотанных из прямоугольного провода с изоляцией класса В. Выводные концы обмотки ротора пропущены через отверстие в центре вала и соединены с контактными кольцами.

Явнополюсные синхронные машины 14—20-го габаритов мощностью свыше 1 000 *квт* при 1 000 *об/мин* выпускают в качестве синхронных электродвигателей серии СДН и генераторов серии СГН. Возбудителями служат машины постоянного тока серии ПВ, спроектированные на базе единой серии П, которые у быстроходных машин имеют непосредственное соединение с валом синхронной машины, а у тихоходных соединены с валом машины через клиноременную передачу. Синхронные машины серий СДН и СГН имеют открытое исполнение с самовентиляцией.

В сериях СДН и СГН применяются две конструкции машин в зависимости от скорости вращения. Для тихоходных машин всех габаритов со скоростями вращения 100—500 *об/мин* применяется конструкция с привернутыми к ободу полюсами ротора; для быстроходных машин со скоростями вращения 600—1 000 *об/мин* применено крепление полюсов к ротору Т-образными выступами. В остальном конструкции быстроходных и тихоходных машин аналогичны.

На рис. 9-19 показана конструкция тихоходной машины. Корпус статора *5* выполнен сварным из листовой стали и состоит из стоек, соединенных продольными ребрами, на которых центрируются сегменты статора. В наружной обшивке вырезаны окна для охлаждающего воздуха. Корпуса статора машин 14—19-го габаритов неразъемные, а корпус 20-го габарита имеет разъем по горизонтальной плоскости.

Сердечник статора *6* состоит из штампованных сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*, собранных в пакеты и спрессованных стяжными шпильками *7*. Сердечник разделен вентиляционными каналами на пакеты. В открытые пазы статора уложена двухслойная петлевая обмотка *8*, состоящая из катушек, намотанных из прямоугольного провода с непрерывной компаундированной изоляцией из микаленты. Катушки удерживаются в пазах гетинаксовыми клиньями. Лобовые части обмотки защищены щитами *4*, собранными из отдельных секторов. Выводные концы обмотки статора машин 14 и 15-го габаритов присоединены к коробке выводов, расположенной сбоку корпуса выше фундаментной плиты, а у машин 16—20-го габаритов они располагаются в нижней части корпуса с выходом в фундаментную яму.

Остов ротора *11* изготовляется либо сварным, либо литым из чугуна или стали. Сердечники полюсов *9* склепаны из листов стали марки Ст.3 толщиной 1—1,5 *мм* и крепятся версы щеткодержателей, согнутые из стальной полосы и оцинкованные. К траверсам крепятся силуминовые щеткодержатели с пружинным механизмом давления щеток на коль-

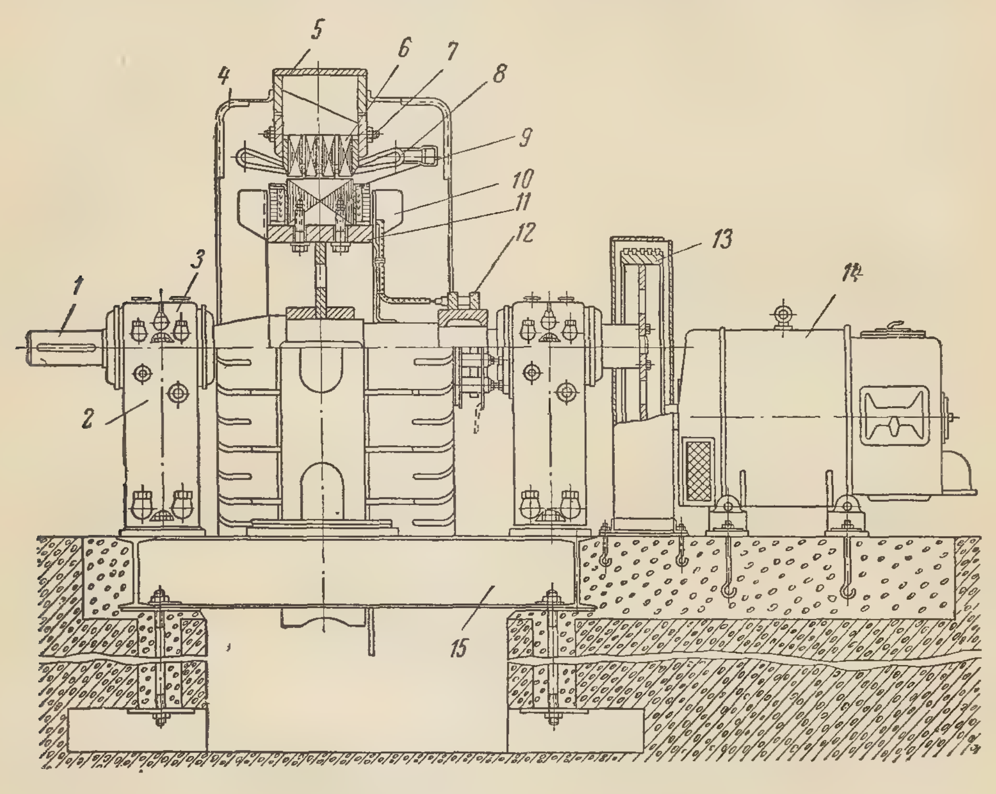


Рис. 9-19. Синхронный генератор СГН.

вместе с надетыми на них катушками к ободу ротора болтами. Катушки ротора намотаны из шинной меди на ребро и надеты на изолированные микафолием сердечники полюсов. К ободу ротора с обеих сторон привинчены ковшеобразные лопатки *10* центробежных вентиляторов. Пусковая обмотка электродвигателей и успокоительная генераторов состоят из круглых медных или латунных стержней, вставленных в отверстия, выштампованные в башмаках полюсных сердечников, и соединенных короткозамыкающими сегментами. Все сегменты соединяются медными накладками для обеспечения продольно-поперечного демпфирования.

Контактные кольца *12* стальные со шлифованной контактной поверхностью. Над ними укреплены тра-ца. Щетки графитные марки Г-3 или электрографитированные марки ЭГ-4.

Шейки вала *1* опираются на два стояковых подшипника скользящего трения с кольцевой или комбинированной смазкой. Стояки *2* подшипников литые чугунные с разъемной головкой *3*. В головки подшипников вставлены вкладыши, рабочая поверхность которых залита баббитом. Масло подается двумя латунными кольцами, а в машинах с комбинированной смазкой осуществляется дополнительная подача смазки под избыточным давлением 0,25—0,5 *ат*. Стояки подшипников установлены на фундаментной плите *15*, сваренной из листовой стали коробчатого сечения или двутаврового проката. К торцу вала привернут шкив *13* клиноременной переда-

чи для привода возбудителя *14*.

На рис. 9-19а показан внешний вид машины.

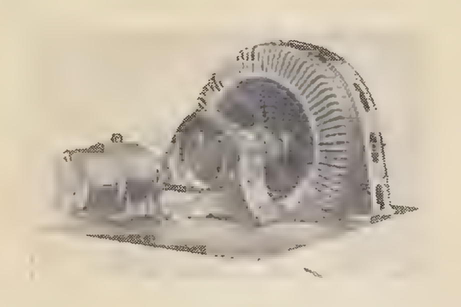


Рис. 9-19а. Внешний вид синхронного генератора СГН.

б) **Гидрогенераторы.** *Общие принципы конструкции.* Гидрогенераторы предназначаются для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами. По конструктивным формам исполнения гидрогенераторы делятся на горизонтальные и вертикальные. Первые строятся обычно небольших мощностей от 450 до 3 125 *ква* и по конструкции мало отличаются от явнополюсных синхронных машин общего применения. В последние годы применяются горизонтальные гидрогенераторы большой мощности, в том числе капсюльного типа, которые размещаются вместе с турбиной в толще плотины.

Основные типы гидрогенераторов являются вертикальными. Они охватывают огромный диапазон мощностей от 120 до 500 000 *ква* и в большинстве являются машинами тихоходными со скоростями вращения около 100 *об/мин.* Лишь для высоконапорных станций скорости вращения повышаются до 375 *об/мин* и более. Низкие скорости вращения при больших мощностях приводят к огромным размерам диаметра статора, достигающим 16 *м.*

Несмотря на низкие угловые скорости вращения, максимальная окружная скорость ротора достигает 100 *м/сек* и более. Это объясняется большим отношением угонной скорости вращения к номинальной, которое в зависимости от типа турбины достигает двух-трехкратного значения, что не имеет места в других типах электрических машин. Для поддержания синхронной скорости вращения при колебаниях нагрузки гидрогенераторы строят с большим маховым моментом; этим достигается большое отношение диаметра к длине активной части (около 7—10). Оба эти обстоятельства создают трудности при проектировании ротора генератора вследствие огромных центробежных сил.

Одной из самых ответственных и сложных частей вертикального гидрогенератора является подпятник, который должен выдерживать при работе вес ротора генератора, ротора турбины и давление воды. Нагрузка на подпятник крупного гидрогенератора превышает 3 000 *Т.* По расположению подпятника вертикальные гидрогенераторы разделяются на два основных типа: подвесные и зонтичные. В подвесном типе подпятник расположен над ротором (рис. 9-20) и всю его нагрузку должна выдерживать верхняя крестовина. В зонтичном типе подпятник расположен под ротором (см. рис. 9-21) и опирается на нижнюю крестовину, которая имеет меньший диаметр. В современных зонтичных гидрогенераторах подпятник опирается на крышку турбины, благодаря чему разгружается нижняя крестовина. Первые гидрогенераторы строились с двумя направляющими подшипниками. Большинство современных генераторов имеет один направляющий подшипник. В качестве второго используют подшипник турбины, расположенной в нижней части шахты.

Когда генератор работает с номинальной скоростью вращения, в подпятнике устанавливается масляная пленка, которая обеспечивает жидкостное трение. При отключении генератора, когда скорость ротора начинает снижаться, масляная пленка исчезает и начинается полусухое трение, которое может повредить баббитовую заливку сегментов подпятника. Между тем вследствие большого махового момента и фильтрации воды через задвижки ротор может долго вращаться по инерции после прекращения подачи воды в

турбину. Поэтому в гидрогенераторах предусмотрены тормоза, которые пускают в действие после того, как ротор достигнет половинной скорости вращения. Этими же тормозами пользуются как домкратами для подъема ротора при монтаже и при регулировке или замене сегментов подпятника.

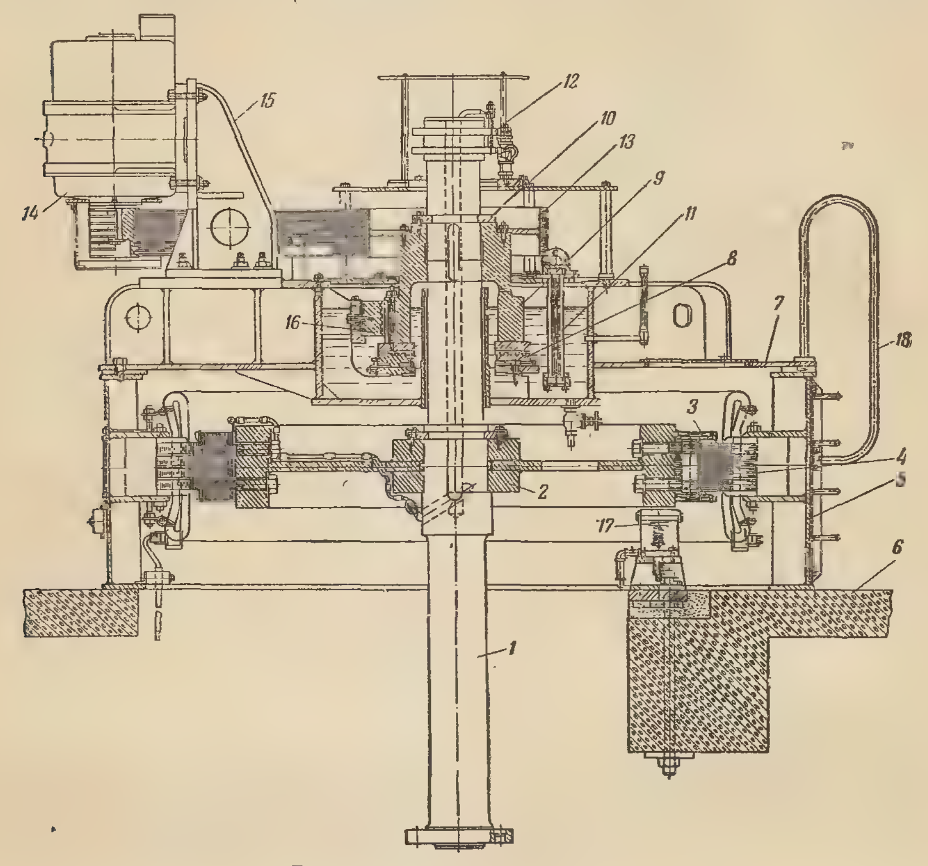


Рис. 9-20. Гидрогенератор ВГС.

Гидрогенераторы для сельских ГЭС. Для использования энергетических ресурсов малых рек построено большое количество гидроэлектростанций местного значения. Они оборудованы гидрогенераторами серии ВГС, охватывающими мощности 200—4 000 *ква* при скоростях вращения от 100 до 375 *об/мин.* На рис. 9-20 представлен продольный разрез гидрогенератора подвесного типа ВГС-3-260/20-24. Обозначение типа расшифровывается следующим образом: В — вертикальный, Г — генератор, С — синхронный. За буквами следует номер серии (3). После номера серии ставится дробное число, в котором числитель показывает внешний диаметр статора в сантиметрах, а знаменатель — длину сердечника статора в сантиметрах. Последнее число обозначает число полюсов.

На вал *1* напрессована втулка ротора *2*, состоящая из сваренных диска, ступицы и обода. Для предохранения от сдвига втулки вдоль вала она сверху заперта разрезным кольцом из двух половин, прикрепленных болтами к ступице и входящих в заточку вала. Толщина обода определяется не только магнитным сечением, но и маховым моментом. Сквозь обод пропущены болты, которыми крепятся полюсы *3*. В сердечник полюса впрессован стержень, в который ввертываются болты. Это обеспечивает плотное прилегание

полюса к ободу и повышает прочность болтового крепления. На полюсы надеты катушки, намотанные из шинной меди на ребро. Статор *4* разделен на пакеты и спрессован стяжными шпильками между двумя дисками из листовой стали. Эти диски приварены к корпусу статора *5*. Корпус опирается на бетонный фундамент *6*.

На верхнюю часть корпуса накладывается верхняя крестовина *7*, состоящая из диска и штампованных лап коробчатого сечения. В центральной части крестовины помещается масляная камера, на дне которой установлены сегменты подпятника *8*. Их установка регулируется при помощи регулировочных болтов. На подпятник опирается кольцо, привернутое ко втулке *9*, насаженной на вал и запертой разрезным кольцом *10*. Для отвода тепла из масляной камеры в ней помещаются маслоохладители *11*, по трубкам которых циркулирует вода.

На верхний конец вала насажены контактные кольца *12*, на которых установлены щетки в щеткодержателях. В качестве возбудителя применен быстроходный генератор *14* серии ПН, который укреплен вертикально на кронштейне *15*. Вращение возбудителю передается через клиноременную передачу *13*. В кронштейн упирается болт, позволяющий регулировать натяжение ремней. Ток возбуждения от возбудителя через щетки и контактные кольца передается по проводам, проходящим через отверстие в центре вала, и подводится к полюсным катушкам.

К цилиндрической поверхности втулки *9* прилегают сегменты направляющего подшипника *16*. Весь подпятник и бо̀льшая часть направляющего подшипника погружены в масло. Масляная камера образуется из внешнего кольца, кольцевого дна и внутренней трубки, сквозь отверстие которой проходит вал. Для спуска масла предусмотрен специальный кран, а для наблюдения за уровнем масла в корпус камеры ввернут маслоуказатель. Генератор имеет один направляющий подшипник; второй подшипник расположен на валу ротора гидравлической турбины. Валы генератора и турбины жестко соединены фланцами и при монтаже точно выверяются на отсутствие биений.

Тормоз *17* представляет собой цилиндры, в которые для торможения подается сжатый воздух. Тормозные колодки прижимаются поршнем к ободу ротора. При использовании в качестве домкрата в цилиндры тормозов подается под давлением масло. Ввиду того что гидрогенератор представляет собой громоздкое сооружение, в нем предусматриваются специальные лесенки *18* для обслуживающего персонала. На рис. 9-20а показан внешний вид гидрогенератора ВГС.



Рис. 9-20а. Внешний вид гидрогенератора ВГС.

При проектировании гидрогенераторов необходимо учитывать условия монтажа, которые для них сложнее, чем для машин с горизонтальным валом. Поэтому здесь кратко изложен порядок монтажа и сборки узлов.

На монтажную площадку поступают следующие узлы генератора: обмотанный статор, ротор с привернутыми полюсами, возбудитель, контактные кольца, траверса со щеткодержателями. Перед началом монтажа насаживают ротор на вал в вертикальном положении и монтируют токоподвод к обмотке ротора. Ко втулке подпятника *9* привертывают диск подпятника, производят сборку и пригонку сегментов подпятника. Соединяют тормоза с подставками и устанавливают их на фундамент.

В процессе монтажа ротор с валом устанавливают на тормоза над турбинной шахтой и выверяют оси валов генератора и турбины. Статор устанавливают на фундаменте и центрируют относительно ротора для получения равномерного воздушного зазора по окружности. На торец статора устанавливают верхнюю крестовину и центрируют ее относительно вала. Собирают подпятник в камере верхней крестовины и насаживают на вал втулку подпятника, после чего опору ротора переносят с тормозов на подпятник. Ротор проворачивают вручную и выверяют перпендикулярность оси вала плоскости подпятника. Валы турбины и генератора стягивают болтами и производят пробную прокрутку роторов вручную. Заливают цементом фундаментные плитки тормозов и статора. Затем монтируют остальные узлы и детали гидрогенератора: маслоохладители, возбудитель, клиноременную передачу, контактные кольца, траверсу, трубопроводы и др. Производят пробный пуск агрегата от турбины, сушку обмоток генератора и испытание его под нагрузкой.

В связи со сплошной электрификацией страны от мощных электростанций через разветвленную сеть электропередач местные электростанции утрачивают свое значение, так как вырабатываемая ими энергия значительно дороже, а количество энергии тесно связано с сезонными колебаниями уровня воды.

Гидрогенераторы большой мощности. Конструкции гидрогенераторов большой мощности значительно сложнее конструкции ВГС. По условиям железнодорожных перевозок статор генератора должен быть составным из двух—шести частей, а ротор отправляется на место монтажа в разобранном виде.

Для предохранения от запыления обмоток предусматривается система вентиляции по замкнутому циклу, а для охлаждения воздуха в статор встраиваются специальные воздухоохладители.

При электромашинном возбуждении гидрогенератор представляет собой многомашинный агрегат из четырех—пяти машин на одном валу.

Согласно ГОСТ 5616-63 гидрогенераторы мощностью 1 700 *ква* и выше должны иметь установленные на одном валу или приводимые от вала генератора электрические синхронные генераторы (регуляторные генераторы) для питания регуляторов гидравлических турбин с частотой 50 *гц* с постоянными магнитами. Для упрощения конструкции и повышения надежности работы применяются ионные системы возбуждения. При мощностях свыше 300 000 *квт* требуется непосредственное охлаждение проводников обмоток.

На рис. 9-21 представлен продольный разрез гидрогенератора для Волжской ГЭС имени Ленина мощностью 123 500 *ква* при 68,2 *об/мин.* Как и бо̀льшая часть крупных гидрогенераторов, он имеет зонтичную конструкцию с подпятником *11* под ротором и одним направляющим подшипником *4*, расположенным над ротором. Такое расположение подшипника и подпятника упрощает их монтаж и обслуживание и увеличивает базу между направляющими подшипниками. Для упрощения производства и монтажа вал генератора составлен из двух частей: основного вала *7* и надставки *1*. На одной оси с генератором расположены вспомогательный генератор *6*, возбудитель главного генератора *3* и возбудитель вспомогательного генератора *2*. В верхней части надставки вала расположен ротор углоизмерительного генератора. Вал генератора жестко соединен с валом гидротурбины *17*. В центральное отверстие в валу гидрогенератора вставлен механизм поворота лопастей гидротурбины.

На вал генератора в горячем виде насажена втулка ротора *8*, к которой привинчены два диска, а к ним — спицы ротора *10*, сваренные из листовой стали. На балках остова ротора центрируются сегменты обода ротора. Полюсы *15* с надетыми на них катушками крепятся к ободу при помощи Т-образных выступов с клиньями. К нижней части обода привинчены тормозные сег-

менты, в которые при торможении упираются накладки тормозов *13*. Ко втулке ротора привинчен диск подпятника *9*, нижняя поверхность которого отшлифована до чистоты поверхности 12-го класса. Диск опирается на залитые баббитом поверхности сегментов *11*, которые расположены в два кольцевых ряда по 12 в каждом ряду. Каждая пара сегментов опирается на балансирное устройство для равномерного распределения нагрузки между ними. Общая нагрузка на подпятник составляет 3 400 *Т*. Подпятник опирается на крышку турбины, благодаря чему вместо нижней крестовины имеется лишь тонкая перегородка *16*, отделяющая генератор от турбинной шахты. В камеру подпятника встроены маслоохладители трубчатого типа, через которые циркулирует вода.

Статор *14* состоит из шести частей («шестерок»), которые собирают в кольцо в процессе монтажа. Стыки шестерок стягивают шпильками. Остов статора опирается на фундамент. В открытые пазы сердечника статора вложена обмотка стержневого типа. На верхний торец остова статора опирается верхняя крестовина *5*, в которую встроен направляющий подшипник *4*. Центровка верхней крестовины производится домкратами, опирающимися на стенки фундамента.

Рис. 9-21. Гидрогенератор Волжской ГЭС имени В. И. Ленина.

Малая скорость вращения агрегата приводит к увеличению размеров не только основного генератора, но и вспомогательных машин. Поэтому остов статора вспомогательного генератора 6 состоит из четырех частей. На надставке вала 1 смонтированы контактные кольца генератора, роторы возбудителей 3 и 2, а также ротор углоизмерительного генератора. Статоры этих машин опираются на верхнюю крестовину.

Вентиляция генератора осуществляется вращением ротора, обод которого разделен на пакеты. Нагретый воздух охлаждается, проходя между трубками воздухоохладителей, по которым циркулирует вода. Направление охлаждающего воздуха в замкнутой системе генератора показано на рисунке стрелками.

На рис. 9-21а показан общий вид агрегата вместе с турбиной, смонтированного в шахте плотины.



Рис. 9-21а. Гидроагрегат Волжской ГЭС имени В. И. Ленина.

Монтаж генератора разделяется на подготовительные операции, производимые на монтажной площадке, и монтажные, производимые непосредственно в шахте. На монтажной площадке соединяют шестерки статора в кольцо, стягивают их болтами и вкладывают в пазы стержни обмотки на стыках. Роторную звезду собирают на внутреннюю втулку, шихтуют обод ротора, устанавливают и закрепляют полюсы с катушками. Собирают подпятник и регулируют сегменты. Надевают на вал втулку ротора с нагревом. Устанавливают вал со втулкой

на монтажной площадке и проверяют биение надставки вала. Монтируют масляную ванну на верхней крестовине.

тывают валы турбины и генератора. Устанавливают ротор вспомогательного генератора, собирают направляющий подшипник и узел над-

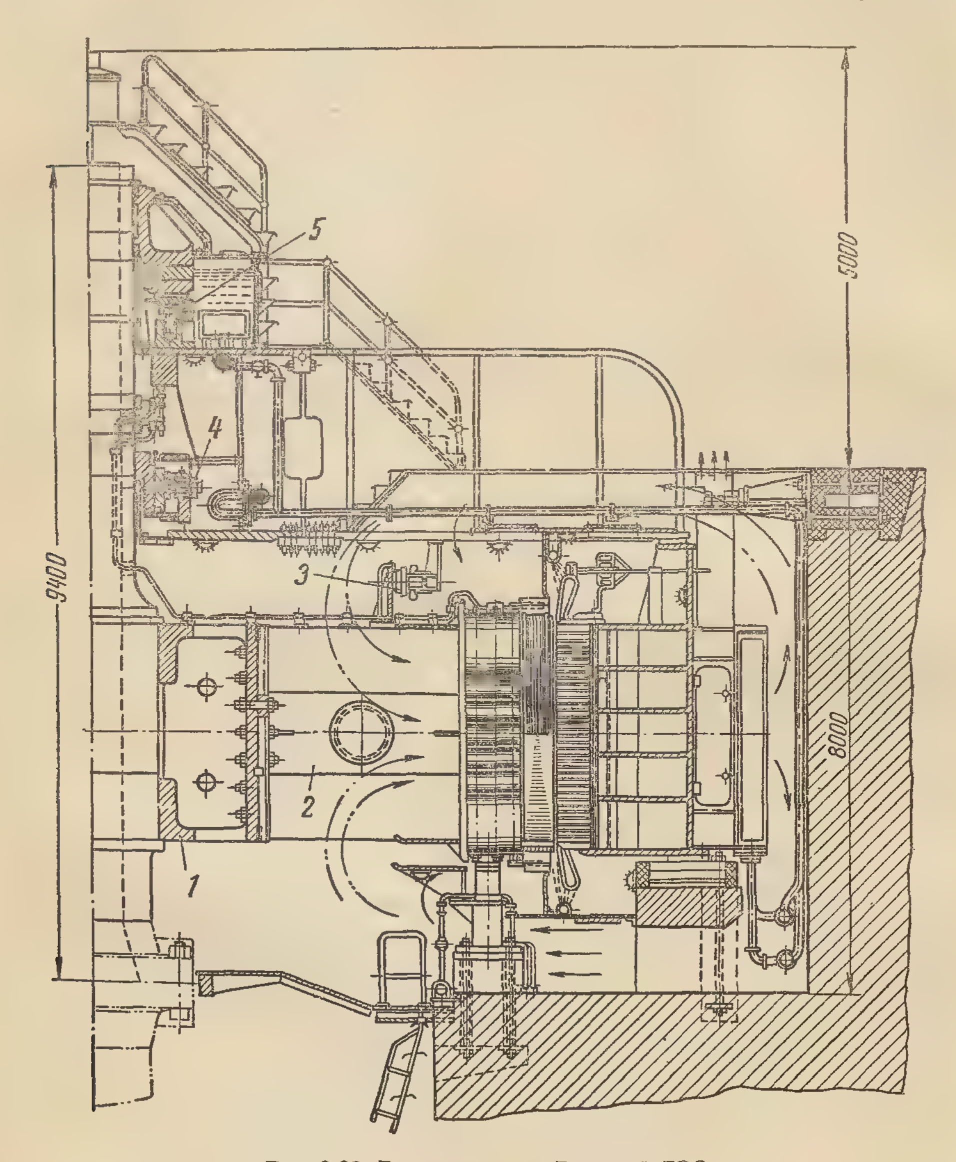


Рис. 9-22. Гидрогенератор Братской ГЭС.

Собранный статор устанавливают на фундаменте. Устанавливают нижнее перекрытие шахты, монтируют тормоза, устанавливают масляную ванну и подпятник. Опускают вал генератора на подпятник и производят центровку валов. Ротор разъединяют со временной втулкой, опускают его в расточку статора, соединяют со втулкой ротора и сверставки вала с возбудителями. Затем устанавливают траверсу со щеткодержателями и монтируют проводку.

На рис. 9-22 представлен продольный разрез гидрогенератора для Братской ГЭС мощностью 264 700 *ква* при 125 *об/мин.* После сравнения различных вариантов конструкции выбран был подвес-

ной тип с одним верхним направляющим подшипником *4*. Подпятник *5* смонтирован в верхней крестовине. Максимальная нагрузка на подпятник составляет 1 600 *Т*, что позволило применить однорядный подпятник. Ионная система возбуждения позволила освободиться от машинных возбудителей, и на одном валу с генератором помещается только вспомогательный генератор *3*.

В генераторе для Братской ГЭС применена оригинальная конструкция роторной втулки *1* с креплением спиц ротора по вертикальным плоскостям. Втулка может быть выполнена либо литой, либо сварной; станочная обработка втулки и звезды ротора обеспечивает правильную форму ротора.

Статор спроектирован нормальной конструкции, несколько усовершенствованной в отдельных элементах. Так, вместо нижних нажимных плит предусмотрен уширенный нижний фланец, на котором крепятся нажимные пальцы. По верхнему и нижнему поясам предусмотрена станочная обработка корпуса статора.

Система воздушной вентиляции генератора радиальная с использованием напорного действия спиц ротора. При проработке конструкции уделено внимание снижению вентиляционных потерь путем придания конструктивным элементам ротора и статора обтекаемых форм.

Дальнейшее увеличение мощности гидрогенераторов в одной единице потребовало повышения линейной нагрузки, что возможно при непосредственном охлаждении водой полых проводников обмоток. Ввиду больших трудностей осуществления непосредственного охлаждения обмотки ротора для гидрогенератора Красноярской ГЭС применена смешанная система охлаждения с использованием воды для непосредственного охлаждения обмотки статора и воздуха для форсированного охлаждения обмотки ротора, что дало возможность повысить мощность в 1,8 раза по сравнению с обычным воздушным охлаждением обмоток и достигнуть мощности 500 000 *квт* в одной единице. При этом расход активной стали на 1 *ква* уменьшился приблизительно в 2, а расход меди в 3—4 раза.

в) Турбогенераторы. *Общие принципы конструкции.* Конструкция турбогенераторов коренным образом отличается от конструкции гидрогенераторов. Это неявнополюсные машины горизонтального типа. Для лучшего использования паровых турбин турбоагрегаты строятся на максимальные скорости вращения; для двухполюсных машин при частоте 50 *гц* скорость составляет 3 000 *об/мин.* Кратность угонной скорости в турбогенераторах составляет 1,2. Развиваемые при этом центробежные силы заставляют применять для ротора высоколегированнную сталь и выполнять его в виде массивной поковки сердечника («бочки») ротора с валом. Однако даже применение высокопрочной стали не позволяет увеличить диаметр ротора свыше 1 150 *мм*, что приводит к большой длине активной части, достигающей 6 000 *мм.* При таком отношении длины к диаметру ротор представляет собой упругую балку и работает за пределами первой критической скорости. При окружной скорости около 180 *м/сек* потери на трение бочки ротора о воздух превышают половину всех потерь в генераторе. Для снижения потерь все крупные турбогенераторы делают с наполнением внутреннего пространства водородом при избыточном давлении 0,05 *ат*. Дальнейшее повышение мощности в одном агрегате требует форсированного охлаждения генератора при давлении водорода внутри машины 3 *ат*. При проектировании сверхмощных генераторов прибегают к непосредственному охлаждению полых проводников обмоток водородом, водой или маслом.

Все турбогенераторы выполняются с неразъемными статорами и для перевозки их по железной дороге применяют специальные платформы. Для осуществления вентиляции по замкнутому циклу применяются охладители, которые при водородном охлаждении встраивают в корпус статора, а при воздушном

обычно помещают под средней частью турбогенератора в проеме фундамента.

Подшипники турбогенераторов имеют принудительную смазку под давлением. Питание обмотки возбуждения производится от специального возбудителя, который соединяется с валом генератора упругой муфтой для защиты от передачи вибраций от одной машины к другой. Для контроля за давлением водорода внутри машины, температурой активных частей и вибрацией предусмотрена специальная аппаратура.

Турбогенераторы серии Т-2. Турбогенераторы серии Т2 выполняются с воздушным охлаждением, поэтому мощность их находится в пределах 12—25 *Мвт*. На рис. 9-23 представлен продольный разрез генератора.

Ротор *1* изготовляется из стальной поковки, в которой профрезерованы пазы для обмотки возбуждения, питаемой от возбудителя *10*. Ток к обмотке ротора подводится через контактные кольца, закрытые кожухом *9*; к ним присоединены выводы обмотки ротора. В пазах обмотка ротора удерживается металлическими клиньями, а на лобовые части напрессованы стальные бандажные кольца *7*.

Статор собран из штампованных сегментов электротехнической стали, которые спрессованы в сварной станине *3* при помощи болтов *4*. В пазах статора уложена обмотка *6*, выводные концы которой подведены к зажимам *12*. Лобовые части обмотки статора привязаны к бандажным кольцам *5* для предохранения от деформации из-за динамических усилий при коротких замыканиях. Сердечник статора разделен на отдельные пакеты *2*, между которыми образуются вентиляционные каналы. Воздух прогоняется вентиляторами *11*, укрепленными на торцах ротора. Корпус статора разделен перегородками на отдельные отсеки, поэтому воздух по одним радиальным каналам направлен от центра, а по другим — к центру генератора. По числу струй горячего воздуха различают двух-, трех- и четырехструйную системы вентиляции. Нагретый воздух охлаждается, проходя через охладители в нижней части корпуса статора.

Турбогенератор имеет один подшипник *8* скользящего трения с принудительной подачей масла от масляного насоса паровой турбины. Второй подшипник со стороны привода встроен в паровую турбину. Подшипник *8* и станина возбудителя *10* изолированы от фундаментной плиты прокладками из гетинакса для разрыва цепи подшипниковых токов, разъедающих подшипники и шейки вала.

Турбогенераторы серии ТВ2. Серия турбогенераторов ТВ2 спроектирована с косвенным охлаждением водородом при избыточном давлении внутри машины 0,03 *ат*. На рис. 9-24 представлен продольный разрез турбогенератора типа ТВ2-100-2. В обозначении типа первая цифра (2) означает номер серии, вторая (100) — мощность генератора и последняя цифра (2) — число полюсов.

Корпус статора *1* сварной конструкции неразъемный газонепроницаемый. Он разделен на семь отсеков; через три четных отсека холодный водород поступает в радиальные каналы сердечника статора, а через четыре нечетных нагретый водород уходит в газоохладители. Таким образом, этот генератор имеет четырехструйную систему вентиляции. В корпус статора встроены восемь вертикальных газоохладителей, по четыре с каждой стороны. Водород прогоняется через машину двумя вентиляторами *4* пропеллерного типа. Наружные диаметры вентиляторов больше внутренней расточки статора, поэтому перед вводом ротора в статор один из вентиляторов временно снимают. В корпусе статора собирают сердечник из штампованных сегментов электротехнической холоднокатаной стали. Каждый сегмент надевается своими канавками на выступы в форме ласточкина хвоста, прострoганные в ребрах статора. На концах ребер нарезана резьба для гаек, стягивающих пакеты сердечника. Во избежание распушения зубцов статора на них установлены нажимные

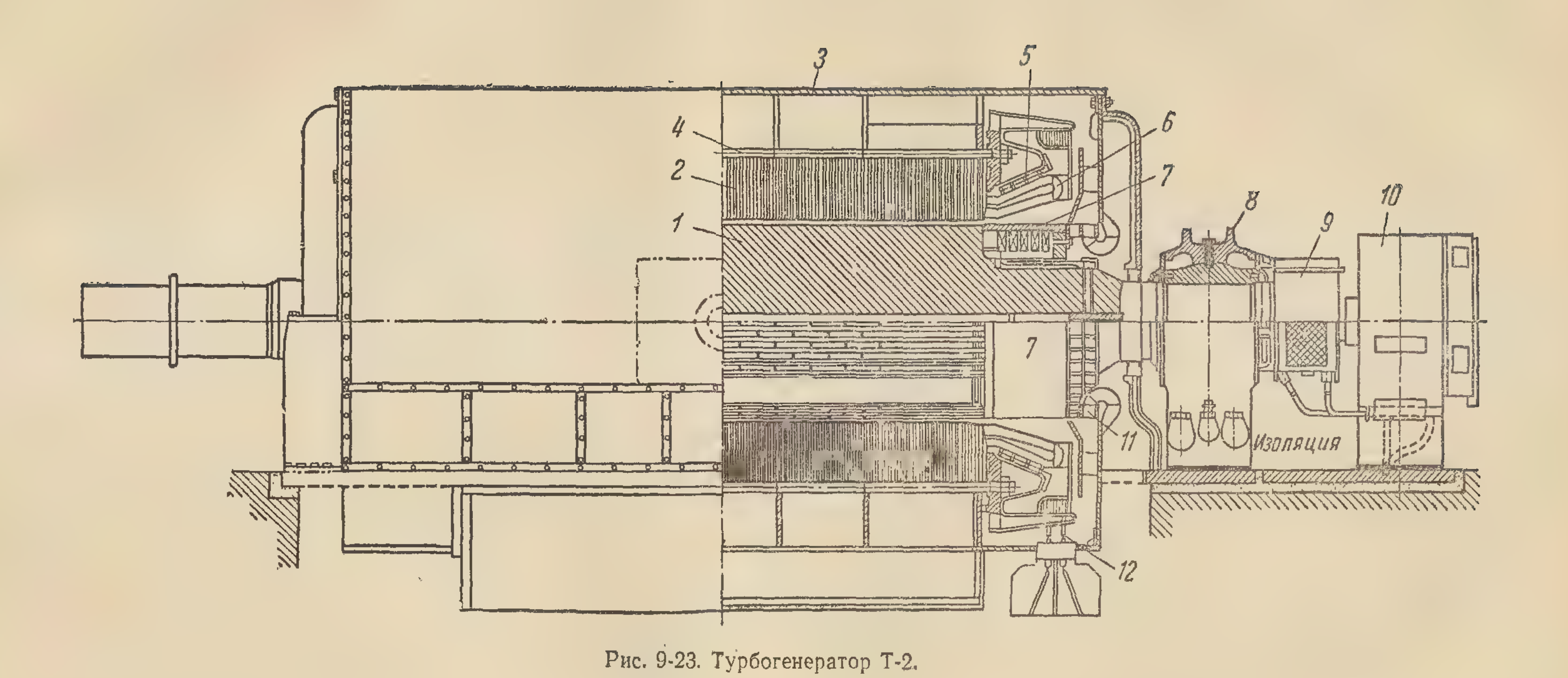


Рис. 9-23. Турбогенератор Т-2.

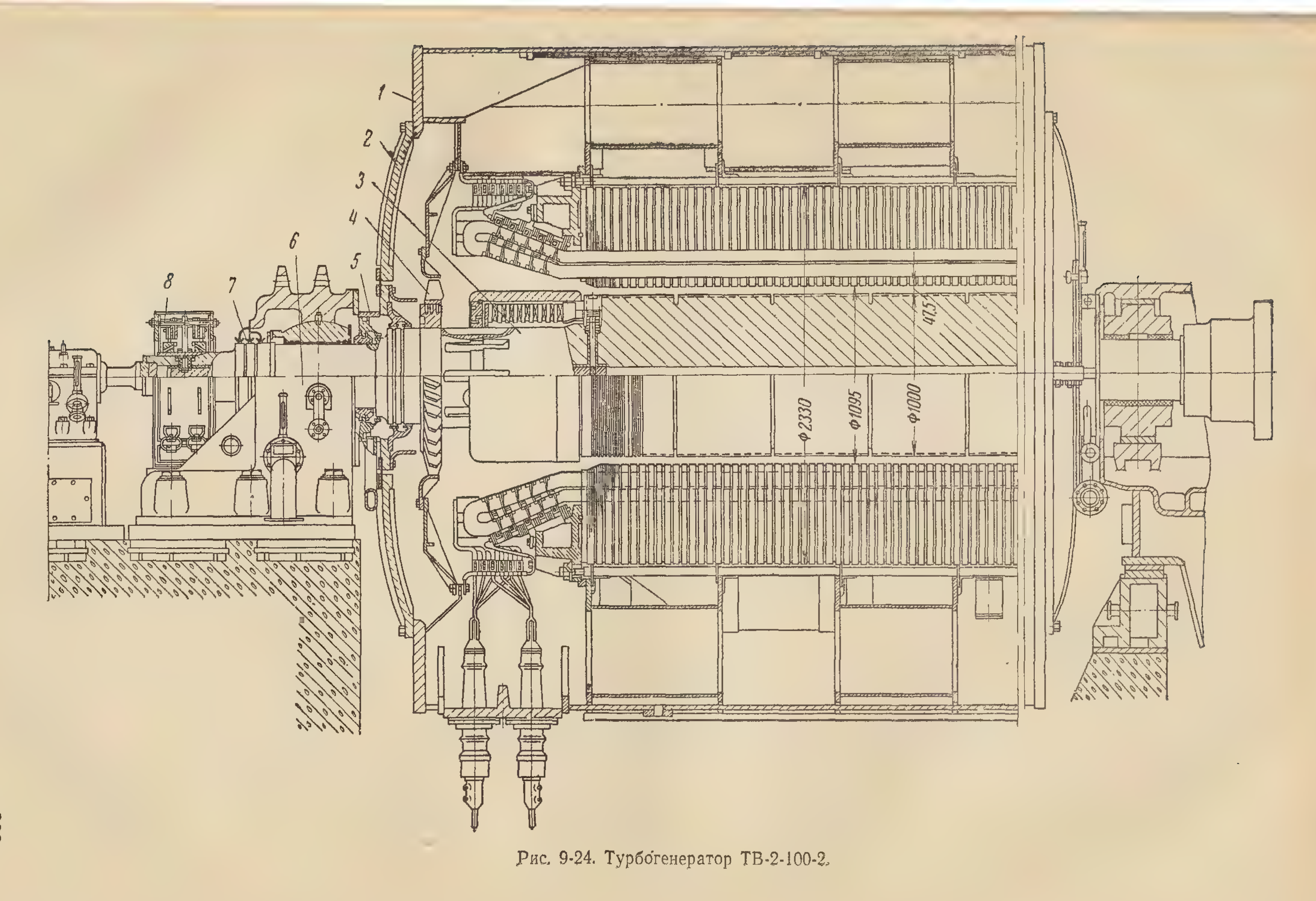


Рис. 9-24. Турбогенератор ТВ-2-100-2.

пальцы, на которые давят нажимные плиты, состоящие из отдельных секторов.

В открытые пазы статора вложены стержни обмотки с непрерывной изоляцией из микаленты, пропитанной под вакуумом. Лобовые части обмотки привязаны к четырем бандажным кольцам. Над ними расположены соединения между катушечными группами обмотки. Выводы обмотки расположены в нижней части корпуса статора в фундаментной яме.

В бочке ротора профрезерованы пазы для обмотки возбуждения. Обмотка в пазах удерживается клиньями из дюралюминия, а на лобовые части напрессованы массивные бандажные кольца из немагнитной стали. На всей поверхности бочки ротора проточены мелкие канавки для увеличения поверхности охлаждения и, кроме того, восемь глубоких канавок для снятия напряжений. Бандажное кольцо опирается на бочку ротора и полуэластичное центрирующее кольцо. Наружный диаметр бандажных колец больше диаметра бочки, но меньше расточки статора для возможности ввода ротора в статор. Под бандажными кольцами в валу *3* профрезерованы каналы для подвода газа к лобовым частям обмотки. С обеих сторон корпус статора закрыт литыми из стали щитами *2*, которые имеют разъем по горизонтальному диаметру. Для обеспечения герметичности корпуса в стыках щитов и местах прилегания к корпусу проточены канавки, в которые вложены резиновые жгуты.

Шейки вала опираются на два подшипника скольжения, из которых один смонтирован в стояке *6*, а другой — в цилиндре низкого давления паровой турбины. Вкладыш подшипника имеет шаровую наружную поверхность, позволяющую ему устанавливаться по направлению оси ротора. Смазка подшипников принудительная от масляной системы турбины. Для предохранения от утечки газа из корпуса предусмотрены масляные уплотнения *5* плавающего типа, которые соединены со щитами эластичной шайбой из полихлорвинилового пластиката. Такое уплотнение одновременно исключает передачу на корпус статора механических вибраций подшипников. В кольцевые камеры уплотнений нагнетается масло с избыточным давлением 0,3—0,5 *ат* при избыточном давлении газа внутри корпуса 0,05 *ат*. Растекание масла вдоль вала предохраняется уплотнениями *7* лабиринтного типа. Конструкция уплотнений допускает разборку подшипников без выпуска газа из корпуса генератора. Для устранения подшипниковых токов стояковый подшипник и оба подшипника возбудителя изолированы от фундаментной плиты. Конструкция возбудителя показана на рис. 9-4.

В роторе каждого турбогенератора просверлено сквозное осевое отверстие. Оно используется для контроля поковки перископическим методом на отсутствие трещин и посторонних включений. Кроме того, контроль поковки производится на ультразвуковой установке.

В крупных турбогенераторах для уменьшения расстояния между подшипниками контактные кольца *8* выносят за пределы подшипника в сторону возбудителя. Для подвода тока к обмотке ротора используют осевое отверстие в роторе. В него запрессовывают два медных изолированных стержня полукруглого сечения. Ток к ним подводят через ввернутые в них медные шпильки, также изолированные от ротора. Токоподвод должен быть герметичным во избежание утечки газа из корпуса генератора.

Турбогенератор поставляется на место монтажа в разобранном виде. В комплект генератора входят статор с охладителями, ротор, подшипники, возбудитель, системы теплоконтроля и автоматического управления водородным охлаждением.

Перед монтажом генератора проверяют газоплотность статора и ротора в отдельности. Для этого отверстия в торцевых щитах закрывают заглушками. При избыточном давлении углекислого газа внутри корпуса 0,8 *ат* устраняют все утечки.

Для проверки ротора углекислоту нагнетают в центральное отверстие. Из монтажных операций одной из важных является ввод ротора в статор. Для этого под шейки вала подводят две тележки, из которых одна катится по рельсам, начаются для работы в качестве генераторов реактивной мощности и служат для улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения при частоте 50 *гц*. Компенсатор не имеет выведенного конца вала, что упрощает гермети-

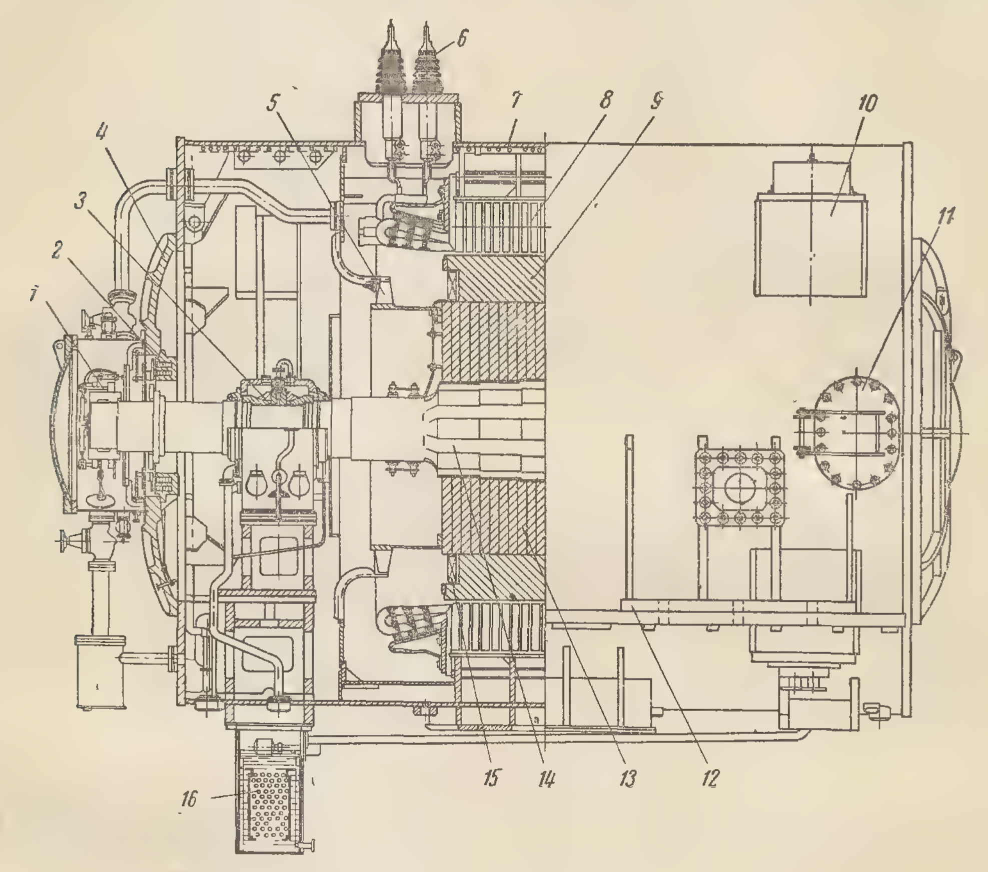


Рис. 9-25. Синхронный компенсатор КСВ.

уложенным на полу станции, а другая по стальному листу, положенному в расточку статора.

Для генераторов мощностью свыше 100 000 *квт* применяют непосредственное охлаждение активных частей. Так, в турбогенераторах завода «Электросила» применяют форсированное охлаждение ротора водородом при избыточном давлении 2 *ат* и охлаждение полых проводников обмотки статора пропусканием через них воды под давлением.

г) **Синхронные компенсаторы.** Синхронные компенсаторы предназзацию его наружной оболочки при водородном охлаждении.

На рис. 9-25 представлена конструкция синхронного компенсатора с водородным охлаждением типа КСВ 50000-11 мощностью 50 000 *квар* при скорости вращения 750 *об/мин* и избыточном давлении водорода 1 *ат*. Напряжение компенсатора 11 *кв*. Возбуждение осуществляется от отдельно стоящего возбудительного агрегата.

Для обеспечения газоплотности корпус компенсатора выполнен неразъемным цельносварным без отдельных подшипниковых щитов.

Подшипники стоякового типа встроены внутри корпуса. Корпус компенсатора состоит из цилиндрической обшивки *7*, вертикальных рам, к которым крепится сердечник статора *8*, торцевых круглых фланцев, ребер и лап *12*, которыми компенсатор устанавливается на фундаменте. К торцевым фланцам корпуса привинчены литые неразъемные щиты *4* с резиновыми прокладками для обеспечения герметичности. К одному из щитов прикреплена герметическая камера контактных колец *1*. На боковой поверхности обшивки расположены два герметически закрытых лаза *11*, которые позволяют периодически производить внутренний осмотр машины. В специальных колодцах *10* корпуса расположены вертикально газоохладители, по два по обоим концам корпуса. Газоохладители состоят из латунных трубок с навитыми медными проволочными спиралями. Концы трубок развальцованы в стальных трубных досках. По трубкам циркулирует вода, отводя тепло от водорода, омывающего трубки снаружи. Колодцы газоохладителей уплотнены специальными резиновыми прокладками для изоляции от наружной атмосферы.

Сердечник статора *8* выполнен из электротехнической стали с пониженными удельными потерями и состоит из отдельных пакетов с радиальными вентиляционными каналами между ними. Сердечник спрессован стяжными шпильками и крепится к корпусу уголками, приваренными к рамам корпуса. Жесткость зубцов статора обеспечивается нажимными гребенками.

Обмотка статора двухслойная стержневая волнового типа с укороченным шагом. Стержни обмотки состоят из двух рядов параллельных проводников со стеклянной изоляцией с переплетением по длине статора. Корпусная изоляция класса В непрерывная из микаленты, компаундированная битумно-асфальтовым лаком. Для снижения коронирования стержни поверх изоляции обмотаны асбесто-железистой лентой и покрыты полупроводящими лаками. Лобовые части обмотки надежно закреплены деревянными распорками и привязаны шнуром к изолированным бандажным кольцам из немагнитной стали. Выводы обмотки выполнены на фарфоровых изоляторах *6* с медными токоведущими стержнями, пропущенными через центральное отверстие изолятора с резиновыми уплотнениями. Изоляторы установлены на немагнитной плите в верхней части корпуса машины и имеют надежное механическое крепление, обеспечивающее необходимую газоплотность.

Остов ротора *13* состоит из отдельных пакетов. Для более эффективного охлаждения катушек ротора на валу профрезерованы осевые каналы, через которые водород подводится к внутренней поверхности катушек. На наружных гранях остова ротора профрезеровано по два паза Т-образной формы для крепления полюсов *9*. Полюсы ротора кованые массивные, благодаря чему отпадает необходимость в специальной пусковой обмотке. Торцевые части полюсных башмаков соединены медными сегментами, образующими замыкающие кольца.

Обмотка ротора состоит из отдельных катушек *15*, согнутых на ребро из голых медных шин. Витки катушек изолированы стеклотканью на эпоксидном лаке. Для получения монолитности катушки спрессованы под большим давлением с нагревом для выпекания изоляции. От сердечников полюсов и остова ротора катушки изолированы прессованной изоляцией из стеклоткани и асбестовой бумагой, а также гетинаксовыми шайбами. Между соседними катушками установлены на изоляционных прокладках металлические распорки, притянутые болтами к остову ротора. По обеим сторонам ротора установлены вентиляторы *5* пропеллерного типа, создающие циркуляцию водорода внутри машины.

Контактные кольца *1* насажены на конец вала и закрыты специальным кожухом вместе со щеточным аппаратом. Токоподвод от контактных колец к обмотке возбуждения расположен в центральном отверстии вала и состоит из двух медных изолированных шин, присоединен-

ных к шпилькам контактных колец. С другого конца в шины ввинчены шпильки с конусной резьбой, к которым присоединены выводы обмотки возбуждения. Шпильки в отверстии вала уплотнены резиновыми шайбами.

Кожух контактных колец выполнен герметически закрытым. В нем сделаны два смотровых люка, а спереди — открывающаяся крышка. Для обслуживания щеточного аппарата и контактных колец при неподвижном роторе предусмотрена возможность отделения общего объема водорода в корпусе компенсатора от кожуха контактных колец. Для этого, в компенсаторе имеется уплотнение с электромагнитным управлением. После остановки машины подают постоянный ток в катушку *2* кольцевого электромагнита. При этом якорь электромагнита с резиновым уплотнением притягивает к себе кольцо и камера контактных колец оказывается изолированной от внутреннего пространства машины. Теперь можно открыть крышку кожуха, не выпуская водород из машины.

Ротор вращается в двух подшипниках стоякового типа с разъемными вкладышами *3*, залитыми высококачественным баббитом. Смазка принудительная с замкнутым циклом и охлаждением масла водяным маслоохладителем *16*.

Агрегат возбуждения синхронного компенсатора состоит из возбудителя постоянного тока с независимым возбуждением, подвозбудителя постоянного тока, добавочного маховика и асинхронного двигателя, собранных на общей фундаментной плите.

Управление компенсатором, включая систему водородного охлаждения, полностью автоматизировано. Автоматическое управление водородным охлаждением обеспечивает поддержание заданного давления и чистоты водорода в корпусе компенсатора и сигнализацию при недопустимом повышении или понижении давления водорода. Контроль чистоты водорода осуществляется автоматическим электронным газоанализатором, а контроль и автоматическое поддержание постоянного давления газа в корпусе компенсатора — реле давления.

Компенсатор предназначен для наружной установки. Его конструкция позволяет производить монтаж и выемку ротора без помощи кранов при ревизиях без полного демонтажа.



Рис. 9-25а. Внешний вид компенсатора.

Внешний вид компенсатора показан на рис. 9-25а.

9-7. ВАЛ

а) **Конструкция вала.** Вал в электрической машине является очень ответственной деталью. К конструкции его предъявляются следующие основные требования:

1. Вал должен быть достаточно прочным, чтобы без появления остаточных деформаций выдерживать все нагрузки, возможные при эксплуатации машины, включая аварийные случаи (внезапные короткие замыкания). В машинах со знакопеременной нагрузкой необходимо учитывать усталостные явления в материале вала.

2. Вал должен иметь достаточную жесткость, чтобы прогибы его при работе машины не достигали величин, при которых могут появиться недопустимые искажения равномерности воздушного зазора между ротором и статором. При проектировании необходимо помнить, что жесткость вала мало зависит от материала, поэтому если диаметр средней части вала недостаточен для обеспепечения необходимой жесткости, то

это нельзя устранить применением высоколегированных сталей.

3. Критические скорости вращения вала должны отличаться от рабочих скоростей вращения ротора не менее чем на 30%. Для валов, у которых рабочая скорость больше критической (турбогенераторы), следует определять также вторую критическую скорость.

Для валов электрических машин применяют углеродистую сталь марки Ст.5 (ГОСТ 380-60), углеродистые стали 30, 35, 40 и 45 (ГОСТ 1050-60) и легированную сталь 40Х (ГОСТ 4543-61). Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке. Выбор марки стали для вала является ответственным моментом конструирования машины. Кроме основных прочностных характеристик, следует учитывать пластичность, ударную вязкость, обрабатываемость и способность к восприятию термической обработки.

Форма конструкции вала определяется типом заготовки. Для валов диаметром до 100 *мм* обычно заготовкой служит прокатанный цилиндрический пруток. При цилиндрической форме заготовки расход металла определяется при заданной длине вала только диаметром заготовки. Поэтому валы диаметром до 100 *мм* проектируют с минимальными переходами от одной ступени к другой, что значительно повышает прочность концов вала в опасных сечениях и снижает трудоемкость механической обработки. Примеры конструкций валов из цилиндрических заготовок можно видеть на рис. 9-7, 9-8 и 9-9. В микромашинах с диаметром вала до 5 *мм* в качестве заготовки используют чистотянутый стальной пруток без ступеней. Таким образом, обработка вала отпадает, за исключением шлифовки шеек вала под подшипники.

Валы диаметром более 100 *мм* обычно вытачивают из ступенчатых заготовок, получаемых методом свободной ковки или прессовки. В таких валах допускаются резкие переходы от одной ступени к другой, определяемые уменьшением величины изгибающих моментов по мере удаления от середины вала. Таким образом, форма вала приближается к форме тела равного сопротивления изгибу, особенно со стороны, противоположной приводу, где отсутствует вращающий момент (см. рис. 9-5). Валы, передающие большие вращающие моменты, отковывают вместе с фланцем (см. рис. 9-21). В последнее время особо сложные поковки для крупных валов стали заменять кованосварными конструкциями. Это дает большую экономию металла за счет уменьшения припусков на обработку.

На валу электрической машины обычно имеется несколько шпонок, расположенных на ступенях разных диаметров. Если для каждого диаметра вала применять соответствующую ширину шпонки по ГОСТ 8788-58, то это сильно затруднит обработку, так как придется сменить несколько фрез. Поэтому при проектировании валов современных электрических машин на заводах установилась следующая традиция. Ширину шпонки на выступающем конце вала выбирают по ГОСТ 8788-58, а остальные шпонки берут такой же ширины. Уменьшение ширины шпонки под листами сердечника не является опасным с точки зрения ее прочности, так как эта шпонка имеет бóльшую длину, чем шпонка на конце вала, и расположена на большем диаметре. Следовательно, напряжения в этой шпонке меньше, чем в шпонке на конце вала. Отступление от ГОСТ не нарушает условий взаимозаменяемости, так как сердечник ротора или коллектор в случае их замены могут быть получены только с завода, который изготовил данную машину.

В местах перехода от одного диаметра вала к другому для выхода шлифовального круга в конструкции вала предусматривают канавки. Во избежание сильной концентрации напряжений эти канавки следует делать глубиной около 0,2 *мм* и шириной 3—5 *мм*. Радиусы галтелей вала следует максимально унифицировать для уменьшения числа разновидностей резцов.

Следует избегать применения скошенных шпонок на валу для

образования скоса пазов ротора. Такие канавки вызывают трудности при обработке и особенно при насадке на вал спрессованного сердечника, так как он должен при насадке совершать одновременно поступательное и вращательное движения, т. е. как бы навинчиваться на вал. Поэтому валы диаметром в средней части до 50 *мм* для насадки ротора со скошенными пазами выполняются с рифлением вместо шпонки. Сердечник ротора набирают на специальной оправке со скосом пазов и спрессовывают на ней, а затем перепрессовывают на рифленую поверхность вала (см. рис. 9-7). В асинхронных двигателях с валами большего диаметра ротор насаживают на прямую шпонку, а скос паза переносят на статор.

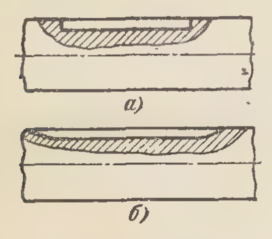


Рис. 9-26. Формы шпоночных канавок, выполненных торцевой (*а*) и дисковой (*б*) фрезами.

В зависимости от типа фрезы шпоночные канавки могут быть получены с отвесной формой конца канавки (рис. 9-26,*а*) при фрезеровании на вертикально-фрезерном станке торцовой фрезой или со скругленными концами канавки при фрезеровании на горизонтально-фрезерном станке дисковой фрезой (рис. 9-26, *б*). Последний способ фрезерования более производителен, но такие канавки нельзя применять под сердечники ротора, так как листы сердечника при прессовке сдвигают шпонку вдоль вала. Наоборот, на конце вала шпоночная канавка со скругленными концами имеет то преимущество, что она создает меньшую концентрацию напряжений в нагруженной ступени вала.

На ступенях вала, на которые производится напрессовка деталей, надо предусматривать так называемые заходные конусы, без которых невозможно произвести насадку детали без перекосов.

На рабочем чертеже вала должны быть указаны все размеры, необходимые для его обработки. Размеры должны иметь допуски на изготовление и на каждой ступени вала должен быть знак чистоты поверхности.

Поковки для валов крупных машин поступают с металлургических заводов в грубо обработанном виде с припуском на чистовую обработку. В центральной части вала у поковок просверлено сквозное отверстие для контроля качества поковки. В гидрогенераторах, соединяемых с поворотнолопастными турбинами, через это отверстие осуществляется поворот лопаток турбины.

Роторная поковка турбогенератора изготовляется из хромо-никель-молибденовой стали вместе с бочкой ротора, в которой на электромашиностроительном заводе фрезеруют пазы для обмотки возбуждения.

б) **Расчет вала.** Перед началом конструирования необходимо определить диаметр вала в средней его части, так как без этого нельзя конструировать сердечник ротора, коллектор, подшипники и другие детали. Однако точно определить диаметр средней части вала нельзя, так как расчет на жесткость в сильной степени зависит от его длины, а она определится только в конце конструирования машины. Поэтому сначала диаметр вала выбирают ориентировочно, а после определения длин его участков производят окончательный расчет. На основании анализа большого числа построенных машин мощностью от 1 до 250 *квт* диаметр d_c вала в средней части можно предварительно определить по следующим соотношениям:

$$\left.\begin{aligned} d_c &= 0{,}25\,D \text{ для машин постоянного тока и синхронных;} \\ d_c &= 0{,}3\ \ D \text{ для асинхронных машин,} \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}1)$$

где D — диаметр якоря или ротора.

Для машин постоянного тока можно также определить предварительно диаметр средней части вала по эмпирической формуле

$$d_c = k_в \sqrt[3]{\frac{P_н}{n}}, \; см, \qquad (9\text{-}2)$$

где $k_в$ определяется в зависимости от диаметра якоря по табл. 9-1.

Таблица 9-1

D, см	10	20	30	40	50 и более
$k_в$	35	30	27	25	24

Для асинхронных машин значения d_c, полученные по формуле (9-2), следует увеличить на 15—20%. Увеличение диаметра вала асинхронных двигателей объясняется тем, что вследствие малой величины воздушного зазора у них допускается меньшая величина прогиба, чем у машин постоянного тока.

После построения продольного разреза машины проводят окончательный расчет вала на жесткость и прочность и в случае необходимости вносят изменения в предварительно определенное значение диаметра средней части вала.

Расчет вала на жесткость. В практике почти всегда достаточно бывает определить прогиб вала в одной его точке на участке расположения сердечника ротора. Наиболее легкий и быстрый способ определения этого прогиба дает аналитический метод, который занимает значительно меньше времени и исключает возможные ошибки, свойственные графическому методу.

При определении прогиба исходят из предположения, что вес всех частей ротора или якоря, включая коллектор, приложен в середине сердечника. Весом частей вала вблизи опор можно пренебречь. Сравнительные расчеты показали, что в этом случае прогиб получается в среднем на 5% больше действительного.

Приближенный вес якоря при насадке листов сердечников непосредственно на вал (принимая якорь и коллектор за сплошные цилиндры со средним удельным весом $\gamma = 8\ Г/см^3$)

$$G = 6{,}3\left[D^2L + D_к^2 l_к\right] \cdot 10^{-3}, \; кГ \qquad (9\text{-}3)$$

Прогиб вала происходит под действием веса ротора или якоря G, силы магнитного притяжения T и реакции передачи $P_п$ на конце вала. Для расчета примем наихудший случай распределения усилий, когда направления сил G и T совпадают, а сила $P_п$ направлена противоположно вверх. На рис. 9-27 показана конструктивная схема вала к расчету на жесткость и прочность. Вал разбит на участки a, b и c. Для расчета вала с продольного разреза машины переносят на схему все расчетные величины, обозначенные буквами.

Для определения жесткости вала с учетом ступенчатой формы необхо-

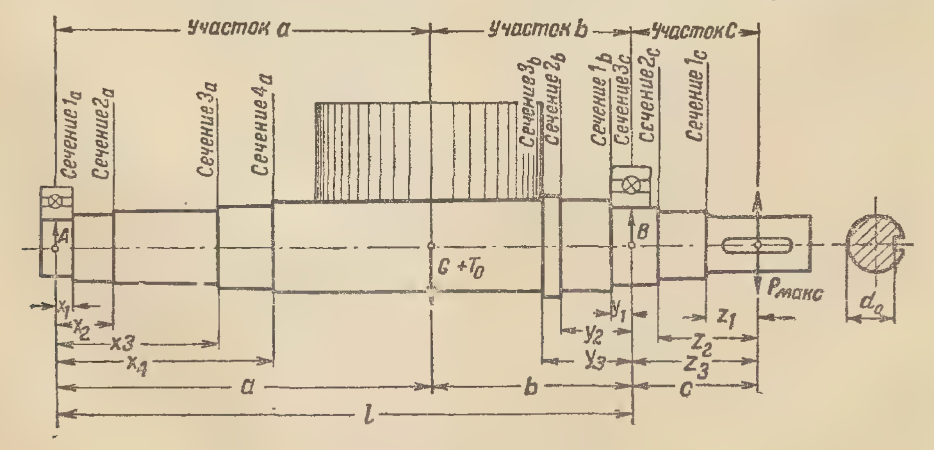


Рис. 9-27. К расчету вала.

Таблица 9-2

Сечения	d_i, см	J_i, см⁴	y_i, см	y_i^3	$y_i^3 - y_{i-1}^3$	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$	y_i^2	$y_i^2 - y_{i-1}^2$	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$
Участок b									
$S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$							$S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$		
Участок a									
Сечения	d_i, см	J_i, см⁴	x_i, см	x_i^3	$x_i^3 - x_{i-1}^3$	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$			
$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$									

димо составить и заполнить следующую таблицу (табл. 9-2).

Номинальный вращающий момент для двигателя

$$M_н = 97\,500 \frac{P_н}{n}, \text{ кГ·см}. \qquad (9\text{-}4)$$

Номинальный вращающий момент для генератора

$$M_н = 97\,500 \frac{P_н}{\eta n}, \text{ кГ·см}, \qquad (9\text{-}5)$$

где $P_н$ — номинальная мощность, *квт*;
n — номинальная скорость вращения, *об/мин*;
η — к. п. д.

Реакция передачи, т. е. поперечная сила, приложенная к выступающему концу вала,

$$P_п = k_п \frac{M_н}{R}, \text{ кГ}. \qquad (9\text{-}6)$$

При передаче упругой муфтой $k_п = 0{,}3$ (учитывая неоднородную плотность кулачков); сила $P_п$ приложена к середине кулачка.

При передаче зубчатыми шестернями $k_п = 1{,}05$; сила $P_п$ приложена в середине шестерни.

При передаче клиновыми ремнями $k_п = 1{,}8$; сила $P_п$ приложена в середине шкива.

При передаче плоским ремнем $k_п = 3$; сила $P_п$ приложена в середине шкива.

R — радиус делительной окружности шестерни или окружности кулачков муфты (см. табл. XI-2), или окружности шкива (см. табл. XI-3 и XI-4).

Прогиб вала посредине сердечника под действием силы G определяем по формуле

$$f_G = \frac{G}{3E\,l^2}(a^2 S_b + b^2 S_a), \text{ см}, \qquad (9\text{-}7)$$

где G — вес ротора по формуле (9-3), *кГ*;
E — модуль упругости $2{,}1 \times 10^6$, *кГ/см²*;

a, b, l — взяты по рис. 9-27;
S_b, S_a — по табл. 9-2.

Прогиб посредине сердечника под действием силы $P_п$

$$f_п = \frac{P_п c}{3E l^2} [(1,5\, lS_0 - S_b)\, a + bS_a], \quad (9\text{-}8)$$

где $P_п$ — взято по формуле (9-6);
S_0 — по табл. (9-2).

Магнитное притяжение ротора возникает за счет неравномерности воздушного зазора, вследствие неточностей сборки и обработки деталей, а также прогиба вала под действием сил G и $P_п$. Первоначальное смещение ротора определяют по формуле

$$e_0 = 0,1\,\delta + f_G + f_п, \ см. \quad (9\text{-}9)$$

Это смещение вызовет появление силы магнитного притяжения, определяемой по формуле

$$T_0 = 3DL \frac{e_0}{\delta}, \ кГ, \quad (9\text{-}10)$$

где D — наружный диаметр ротора, *см*;
L — длина ротора без радиальных каналов, *см*;
δ — воздушный зазор между статором и ротором, *см*.

Формула (9-10) дает максимальное значение T_0, которое получается, как показывают расчеты [Л. 101], при $B_\delta \approx 7\,000$ *гс*. При $2p = 2$ T_0 возрастает примерно в 1,5 раза.

При определении T_0 не учитывается выравнивающее действие уравнительных токов в параллельных ветвях обмоток в отношении распределения поля по окружности ротора.

Прогиб вала под действием магнитного притяжения, вызванного первоначальным смещением ротора, пропорционален прогибу от веса ротора и определяется по формуле

$$f_T = f_G \frac{T_0}{G}, \ см. \quad (9\text{-}11)$$

Прогиб вала под действием магнитного притяжения вызовет увеличение магнитного притяжения, что в свою очередь приведет к новому увеличению прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся. При этом будет иметь место установившийся прогиб под действием магнитного притяжения.

Определим соотношение между первоначальными прогибом вала под действием магнитного притяжения и смещением ротора:

$$m = \frac{f_T}{e_0}. \quad (9\text{-}12)$$

Установившийся прогиб от магнитного притяжения

$$f_м = \frac{f_T}{1 - m}, \ см. \quad (9\text{-}13)$$

Результирующий прогиб вала

$$f = f_G + f_п + f_м, \ см. \quad (9\text{-}14)$$

Для обеспечения надежной работы электрических машин рекомендуются следующие величины допустимого результирующего прогиба вала в середине сердечника при номинальном вращающем моменте:

1. При соединении валов упругой муфтой результирующий прогиб не должен превышать 10% воздушного зазора у асинхронных двигателей, 8% у синхронных машин и 6% у машин постоянного тока.

2. В машинах с ременной передачей результирующий прогиб вала не должен превышать 10% воздушного зазора.

3. При зубчатой передаче из-за ограничения перекоса зубьев результирующий прогиб не должен превышать 10% воздушного зазора у асинхронных двигателей, 7% воздушного зазора у синхронных машин и 5% воздушного зазора у машин постоянного тока.

Кроме прогиба вала в середине сердечника ротора, проверяется также критическая скорость вращения. При критической скорости вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала, т. е. наступает явление резонанса. Если ротор электрической машины рассматривать как однородную систему, то его первая критическая скорость вращения с учетом одностороннего магнитного притяжения приближенно определится по формуле

$$n_к \approx 300 \sqrt{\frac{1-m}{f_G}}, \text{ об/мин}, \quad (9\text{-}15)$$

где m — берется по формуле (9-12);

f_G — по формуле (9-7).

Рабочая скорость вала должна отличаться от критической не менее чем на 30%.

В крупных машинах с большой длиной вала (турбогенераторы) для более точного определения прогиба

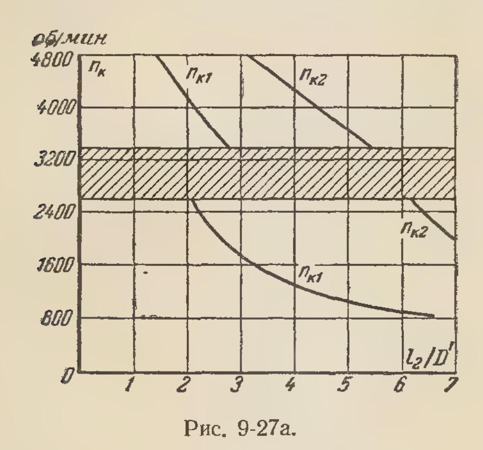


Рис. 9-27а.

и критических скоростей вращения строят графическим методом упругую линию вала.

Для турбогенераторов особенно важно обеспечить спокойную безвибрационную работу. Такая работа возможна только при достаточном удалении его критических скоростей вращения от номинальной. При этом также облегчается балансировка ротора.

Критические скорости вращения ротора в большой степени зависят от отношения длины между опорами к его диаметру.

На рис. 9-27а приведены кривые, выражающие примерные зависимости критических скоростей первой $n_{к1}$ и второй $n_{к2}$ от отношения l_2D' для турбогенераторов завода «Электросила». Как видно из рисунка, при $l_2/D'>2$ (примерно при $P_1 \geqslant 6$ *Мвт*) ротор работает как гибкий вал; вторая критическая скорость $n_{к2}$ наиболее близко подходит к номинальной при $l_2/D'=5 \div 6$.

Заштрихованная область на рис. 9-27а соответствует нерекомендуемым значениям $n_к$.

Критические скорости вращения зависят также от выполнения концевых частей ротора, размеров шеек вала, податливости опор и масляной пленки в подшипниках.

Расчет $n_{к1}$ и $n_{к2}$ производят аналитическими методами с использованием вспомогательных таблиц [Л. 114].

Расчет вала на прочность. Расчет вала на прочность ведется по теории максимальных касательных напряжений. Для определения максимальных значений вращающего и изгибающего моментов вводится коэффициент перегрузки, значения которого принимают:

Для нормальных условий работы	$K=1{,}7$
Для тяжелых условий работы машин переменного тока	$K=2{,}5$
Для тяжелых условий работы машин постоянного тока	$K=3$
Для машин, соединенных с дизельным двигателем	$K=4$

При совместном действии изгиба и кручения приведенное напряжение

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_и^2 + (K\alpha M_{вр})^2}}{W}, \text{ кГ/см}^2, \quad (9\text{-}16)$$

где α — отношение допускаемого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении; для нереверсивных машин принимают $\alpha=0{,}6$, а для реверсивных $\alpha=0{,}8$;

W — момент сопротивления при изгибе: $W=0{,}1\ d^3$, *см³*.

Для расчета на прочность вал разбивают на участки *a*, *b* и *c* (рис. 9-27); результаты расчета вносят в табл. 9-3.

Сопоставив расчетные напряжения с допускаемыми для данного материала, выбирают марку стали.

В сечениях вала, ослабленных шпоночными канавками, момент сопротивления определяют по диаметру d_0 (см. рис. 9-27).

Для снижения концентрации напряжений в галтелях не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3 и отношение радиуса галтели к диаметру вала меньше 0,05.

Пример расчета вала. Исходные данные. Электродвигатель постоянного тока

Таблица 9-3

Расчет вала на прочность

Участок c

Сечение	$M_и = P_п z$	$M_{вр}$	W	σ
1c				
2c				
3c				

Участок b

$$B = (G + T_0)\frac{a}{l} + P_п\frac{l+c}{l}$$

Сечение	$M_и = P_п(c+y) + B_y$	$M_{вр}$	W	σ
1b				
2b				
3b				

Участок a

$$A = (G + T_0)\frac{b}{l} + P_п\frac{c}{l}$$

Сечение	$M_и = Ax$	$M_{вр}$	W	σ
1a				
2a				
3a				

с нормальными условиями работы, соединенный с приводным механизмом эластичной муфтой. Номинальная мощность $P_н = 450$ *квт*, номинальная скорость вращения $n = 1\,000$ *об/мин*.

Диаметр якоря $D = 59$ *см*, длина якоря без вентиляционных каналов $L = 35$ *см*, диаметр коллектора $D_к = 35$ *см*, длина коллектора $l_к = 25$ *см*, воздушный зазор $\delta = 0{,}4$ *см*. Диаметр расположения кулачковой муфты по каталогу $D_0 = 28{,}6$ *см*.

Размеры вала приведены на рис. 9-28.

Расчет на жесткость. Вес якоря по формуле (9-3)

$$G = 6{,}3\,[59^2 \cdot 35 + 35^2 \cdot 25] \cdot 10^{-3} = 960\ кГ.$$

Номинальный вращающий момент по формуле (9-4)

$$M_н = 97\,500 \cdot \frac{450}{1\,000} = 44\,000\ кГ \cdot см.$$

Реакция передачи по формуле (9-6)

$$P_п = 0{,}3 \cdot \frac{44\,000}{14{,}3} = 925\ кГ.$$

Составляем табл. 9-4.

Прогиб вала посредине сердечника под действием веса якоря по формуле (9-7)

$$f_G = \frac{960}{3 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 131^2}\,[81{,}5^2 \cdot 33{,}17 + 49{,}5^2 \cdot 173{,}6] = 0{,}012\ см.$$

Таблица 9-4

Сечение	d_i, см	J_i, см⁴	y_i, см	y_i^3, см³	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, см³	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, см$^{-1}$	y_i^2, см²	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, см²	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, см$^{-2}$
Участок b									
1b	11	719	2	8	8	0,01	4	4	0,006
2b	13	1425	12	1 720	1 712	1,20	144	140	0,01
3b	16	3400	28	22 000	20 280	5,16	780	536	0,16
4b	16,5	3700	49,5	121 000	99 000	26,80	2450	1670	0,45
						$S_b = 33{,}17$			$S_0 = 0{,}71$

Сечение	d_i, см	J_i, см⁴	x_i, см³	x_i^3, см³	$x_i^3 - x_{i-1}^3$, см³	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$, см$^{-1}$
Участок a						
1a	11	719	2	8	8	0,01
2a	12	1080	8	512	504	0,47
3a	13	1425	53	15 000	14 488	10,10
4a	15	2530	57	185 000	170 000	67
5a	16,5	3700	81,5	540 000	355 000	96
						$S_a = 173{,}6$

Прогиб вала посредине сердечника под действием силы $P_п$ по формуле (9-8)

$$f_п = \frac{925 \cdot 40}{3 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 131^2} [(1{,}5 \cdot 131 \cdot 0{,}71 - 33{,}17) \cdot 81{,}5 + 49{,}5 \cdot 173{,}6] = 0{,}0056 \text{ см}.$$

Первоначальное смещение ротора по формуле (9-9)

$$e_0 = 0{,}04 + 0{,}012 + 0{,}0056 = 0{,}058 \text{ см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1 \cdot 9{,}2^3 = 78 \text{ см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{\sqrt{45\,000^2 + 70\,000^2}}{78} = 1\,070 \text{ кГ/см}^2.$$

Сечение $2c$. Изгибающий момент.

$$M_и = 2 \cdot 925 \cdot 37{,}5 = 70\,000 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

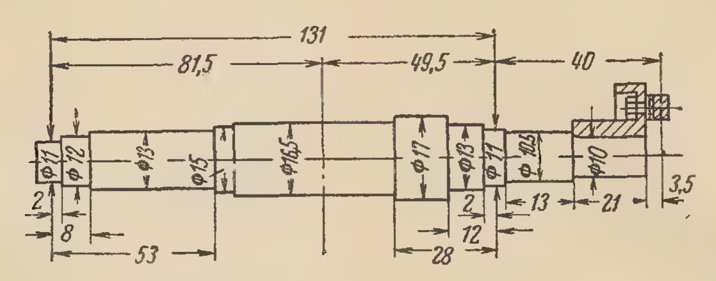


Рис. 9-28. К примеру расчета вала.

Магнитное притяжение по формуле (9-10)

$$T_0 = 3 \cdot 59 \cdot 35 \cdot \frac{0{,}058}{0{,}4} = 900 \text{ кГ}.$$

Прогиб вала под действием магнитного притяжения по формуле (9-11)

$$f_T = 0{,}012 \cdot \frac{900}{960} = 0{,}011 \text{ см}.$$

Отношение первоначального прогиба к смещению якоря по (9-12)

$$m = \frac{0{,}011}{0{,}056} = 0{,}2.$$

Установившийся прогиб вала от магнитного притяжения по (9-13)

$$f_м = \frac{0{,}011}{1 - 0{,}2} = 0{,}0138 \text{ см}.$$

Результирующий прогиб по (9-14)

$$f = 0{,}012 + 0{,}0038 + 0{,}0138 = 0{,}03 \text{ см}.$$

Результирующий прогиб составляет 7,5% воздушного зазора, что удовлетворяет условиям безопасной работы машины.

Критическая скорость вращения по (9-15)

$$n_к = 300 \sqrt{\frac{1 - 0{,}2}{0{,}012}} = 7\,700 \text{ об/мин}.$$

При расчете на прочность проверяем приведенные напряжения в середине выступающего конца вала, ослабленного шпоночной канавкой, и в галтелях на участке вала c.

Сечение $1c$. Изгибающий момент

$$M_и = 2 \cdot 925 \cdot 24{,}5 = 45\,000 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Вращающий момент

$$M_{вр} = 0{,}8 \cdot 2 \cdot 44\,000 = 70\,000 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Вращающий момент

$$M_{вр} = 0{,}8 \cdot 2 \cdot 44\,000 = 70\,000 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1 \cdot 10{,}5^3 = 115 \text{ см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{\sqrt{70\,000^2 + 70\,000^2}}{115} = 850 \text{ кГ/см}^2.$$

Участок вала b. Определим нагрузку вала от установившегося магнитного притяжения якоря по формуле

$$T_м = \frac{T}{1 - m} = \frac{870}{0{,}8} = 1\,100 \text{ кГ}.$$

Реакция опоры по табл. 9-16

$$B = (960 + 1\,100) \frac{81{,}5}{131} + 2 \cdot 925 \cdot \frac{171}{131} = 4\,700 \text{ кГ}.$$

Сечение $1b$. Изгибающий момент

$$M_и = 2 \cdot 925 \cdot 42 + 4\,700 \cdot 2 = 87\,400 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1 \cdot 11^3 = 133 \text{ см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{\sqrt{87\,400^2 + 70\,000^2}}{133} \doteq 840 \text{ кГ/см}^2.$$

Сечение $2b$. Изгибающий момент

$$M_и = 2 \cdot 925 \cdot 52 + 4\,700 \cdot 12 = 151\,000 \text{ кГ} \cdot \text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1 \cdot 13^3 = 220 \text{ см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{\sqrt{151\,000^2 + 70\,000^2}}{220} = 760 \text{ кГ/см}^2.$$

Участок вала *a*. Реакция опоры

$$A = (1\,100 + 960)\,\frac{49{,}5}{131} + $$

$$+ 2\cdot 925\cdot\frac{40}{131} = 1\,345\ \text{кГ}.$$

Сечение *1a*. Изгибающий момент

$$M_{и} = 1\,345\cdot 2 = 2\,690\ \text{кГ}\cdot\text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1\cdot 11^3 = 133\ \text{см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{2690}{133} = 20\ \text{кГ/см}^2.$$

Сечение *2a*. Изгибающий момент

$$M_{и} = 1\,345\cdot 8 = 10\,800\ \text{кГ}\cdot\text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1\cdot 12^3 = 170\ \text{см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{10\,800}{170} = 64\ \text{кГ/см}^2.$$

Сечение *3a*. Изгибающий момент

$$M_{и} = 1\,345\cdot 53 = 71\,500\ \text{кГ}\cdot\text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1\cdot 13^3 = 220\ \text{см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{71\,500}{220} = 325\ \text{кГ/см}^2.$$

Сечение *4a*. Изгибающий момент

$$M_{и} = 1345\cdot 57 = 77\,000\ \text{кГ}\cdot\text{см}.$$

Момент сопротивления

$$W = 0{,}1\cdot 15^3 = 340\ \text{см}^3.$$

Напряжение

$$\sigma = \frac{77\,000}{340} = 225\ \text{кГ/см}^2.$$

Такие низкие напряжения на участке *a* объясняются тем, что в целях унификации подшипников шейки вала приняты одинаковыми.

9-8. КОНСТРУКЦИИ РОТОРОВ

а) Роторы с посадкой активной стали на вал. В машинах малой и средней мощности листы активной стали насаживают непосредственно на вал. Выбор посадки зависит от условий работы машины. Так, для нереверсивных машин со спокойной передачей вращающего момента применяется посадка скольжения С, для реверсивных машин — напряженная посадка Н и для машин с большими пусковыми моментами — тугая посадка Т второго класса точности. Увеличение натяга посадки затрудняет надевание листов на вал, но обеспечивает надежность работы машины. Если пакет ротора надевают на вал в спрессованном виде, как, например, ротор короткозамкнутого двигателя, залитый алюминием, то натяг посадки может быть независимым от допусков на изготовление сопряженных деталей, так как за счет неизбежных сдвигов между отдельными листами внутреннее отверстие ротора уменьшается. Это позволяет снижать точность изготовления сопрягаемых деталей и вместо второго применять классы точности 2а и 3.

Против проворачивания ротора на валу применяют шпонки, рифление поверхности вала, а в микромашинах ограничиваются натягом посадки листов на гладкий вал. Шпоночные соединения можно применять при диаметрах вала от 15 *мм*, так как более тонкие валы фрезеровать под шпоночную канавку практически невозможно. В машинах малой мощности с диаметром вала до 10 *мм* можно насаживать сердечник ротора на гладкий вал с натягом второй прессовой посадки третьего класса точности. Обычно роторы микродвигателей до посадки на вал склеивают из отдельных листов и запекают в печи. Склеенный ротор надежно сидит на валу, не требует специальных деталей для удерживания спрессованных листов от распушения и защищен от отгибания зубцов.

На рис. 9-29 показан лист якоря с открытыми пазами. Размеры пазов имеют допуски четвертого класса точности. Для снижения концентрации напряжений в деталях штампа следует брать наибольшие возможные значения радиуса r_1. Величина радиуса должна быть не менее суммы радиуса закругления проводника обмотки плюс односторонняя толщина изоляции катушки обмотки.

На осевом отверстии, кроме шпоночной канавки, имеется полукруглая лунка, которая ориентирует положение листов при набирании их на вал. Если лунки во всех листах

совпадают, то, следовательно, все листы набирались на вал той же стороной, какой они клались под штамп. Благодаря этому неточности расположения пазов в штампе не сказываются при сборке листов якоря на вал. Однако вследствие зазоров между шпонкой и листами, а также неточностей штамповки и

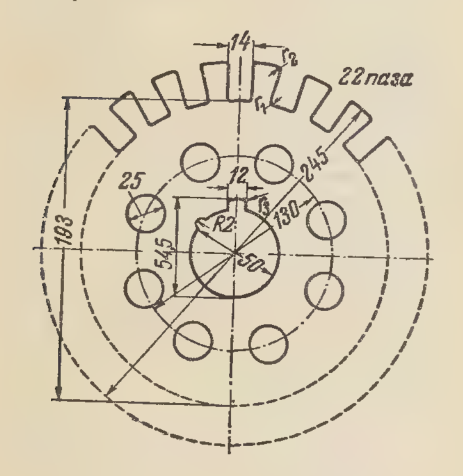


Рис. 9-29. Лист якоря.

сборки размеры пазов в собранном сердечнике (размеры в свету) получаются меньшими, чем размеры пазов в отдельных листах (размеры в штампе). Размеры пазов в свету определяют по укладке обмотки с учетом разбухания изоляции и допусков на забивание катушек в пазы (см. приложения VI и VII). Для уменьшения обработки поверхностей пазов размеры в штампе должны быть больше, чем размеры в собранном сердечнике, на 0,2—0,5 *мм* в зависимости от конструкции штампа и технологии штамповки. При расчете магнитной цепи следует принимать размеры пазов в штампе, как указано в гл. 6.

Для снижения потерь на вихревые токи листы должны быть изолированы при помощи двустороннего покрытия лаком. Исключение составляют листы роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при заливке пазов алюминием и листы статора при заливке его в алюминиевую оболочку (см. рис. 9-6), так как пленка лака в процессе заливки выгорит.

Кроме пазов, в листах штампуют отверстия для образования осевых вентиляционных каналов. В машинах старых серий отверстия располагали вблизи осевого отверстия для вала и придавали им сложную форму (овальную или ромбическую). В малых машинах вентиляционные отверстия соединяли с осевым отверстием для вала. Это сильно усложняло изготовление штампов и ослабляло посадку листов на валу, а эффективность вентиляции снижалась, так как в каналах сложной формы происходили завихрения воздушной струи.

В современных машинах применяют исключительно круглую форму отверстий и располагают их примерно посредине спинки сердечника. Диаметры отверстий берут в пределах 15—30 *мм*. При большой радиальной высоте листа их располагают в несколько концентрических рядов в шахматном порядке.

Сердечники роторов, кроме роторов асинхронных двигателей, залитых алюминием, зажимают между двумя нажимными шайбами, которые имеют кольцевые пояса для поддержки лобовых частей обмотки, называемые обмоткодержателями. Нажимные шайбы не несут больших нагрузок при работе машины, но из-за больших давлений прессовки пакетов их приходится делать стальными. Ввиду сложности выполнения фигурных стальных отливок стали применять штампованные (см. рис. 9-1) и сварные (рис. 9-3) конструкции нажимных шайб.

Форму обмоткодержателей выбирают по форме лобовых частей обмотки. Из-за этого при одновитковых неразрезных обмотках приходится применять разные обмоткодержатели со стороны коллектора и с противоположной стороны якоря.

Листы ротора должны быть заперты на валу в спрессованном состоянии. Для этого применяют или пружинные кольца, врезанные в канавку на валу, или втулки, насаживаемые на вал с большим натягом. В целях упрощения производства кольца квадратного сечения стали заменять кольцами, согнутыми из круглой проволоки.

В машинах постоянного тока нажимная шайба со стороны, противоположной коллектору, упирается в бортик вала, чтобы не ослаблять канавкой нагруженную часть вала. В асинхронных двигателях валы по условию жесткости имеют относительно больший диаметр, поэтому для упрощения обработки валов бортики отсутствуют и обе нажимные шайбы запирают на валу врезными кольцами.

В машинах постоянного тока листы якоря обычно запирают на валу втулками, насаженными на вал (рис. 9-1 и 9-2). Это объясняется тем, что врезное кольцо не допускает выпрессовки вала при ремонте без предварительного снятия коллектора, а следовательно, разъединения паяных соединений обмотки якоря с пластинами коллектора. Надежное крепление сердечника якоря втулкой обеспечивается расчетом посадки и контролем выдерживания допусков, который производится путем проверки деталей после изготовления и наблюдения за усилием прессовки втулки на вал. Рекомендуется втулку насаживать на меньший диаметр вала, чем листы сердечника. Иначе возможны стирание вала листами и ослабление натяга посадки втулки.

Расчет колец и втулок, запирающих ротор на валу. Усилие, сдвигающее шайбу вдоль вала, вызывается упругостью спрессованного пакета q и определяется при расчетах как $^1/_3$ усилия прессовки, что составляет от 5 *кГ/см²* для средних машин до 10 *кГ/см²* для мелких машин. Поверхность листа, на которую действует это давление, подсчитывают как площадь кольца с наружным диаметром $D_п$ окружности, проведенной через середины пазов, и внутренним диаметром d, равным диаметру вала.

Таким образом, усилие, сдвигающее нажимную шайбу, определяют по формуле

$$Q = \frac{\pi}{4}\left(D_п^2 - d^2\right) q, \text{ кГ}. \quad (9\text{-}17)$$

Если нажимную шайбу запирают врезным кольцом, то напряжение на срез кольца прямоугольного сечения определяется как

$$\tau = \frac{Q}{\pi d b}, \text{ кГ/см}^2,$$

где b — ширина кольца.

Для кольца круглого сечения диаметром d_1

$$\tau = \frac{Q}{\pi d d_1}, \text{ кГ/см}^2. \quad (9\text{-}18)$$

Втулки для запирания пакета ротора на валу насаживают с натягом горячей посадки второго класса точности (Гр) по ГОСТ 1042 или второй прессовой посадки третьего класса точности Пр2₃ по ГОСТ 1069.

Сила сцепления втулки с валом определяется по формуле

$$P = pfS, \text{ кГ}, \quad (9\text{-}19)$$

где p — удельное давление между втулкой и валом, *кГ/см²*;

f — коэффициент трения между втулкой и валом, который принимают равным 0,15 при расчете давления пресса и 0,1 при расчете силы сцепления втулки с валом;

S — поверхность соприкосновения между втулкой и валом:

$$S = \pi d l, \text{ см}^2, \quad (9\text{-}20)$$

где d — диаметр вала, на котором сидит втулка, *см*;

l — длина втулки, *см*.

Удельное давление p определяется при наименьшем возможном натяге между стальной втулкой и стальным валом:

$$p = 105 \cdot 10^4 \times \left(1 - \frac{1}{\alpha^2}\right)\delta_{мин}, \text{ кГ/см}^2, \quad (9\text{-}21)$$

где $\alpha = D/d$ — отношение внешнего диаметра втулки к диаметру отверстия во втулке;

δ — относительный натяг, равный Δ/d;

Δ — минимальный натяг по таблицам допусков.

Для предохранения втулки от сдвига вдоль вала необходимо, чтобы

$$\frac{P}{Q} \geqslant 1{,}2.$$

Силу P можно увеличить за счет большего натяга посадки Δ, однако при увеличении натяга возрастает напряжение на растяжение в сечении втулки, которое определяют по формуле

$$\sigma = 105 \cdot 10^4 \times \times \left(1 + \frac{1}{\alpha^2}\right) \delta_{макс}, \; кГ/см^2. \quad (9\text{-}22)$$

Допускают напряжение до 70% предела текучести материала.

Расчет напряжений во втулке, а также расчет усилия пресса ведут при максимально возможном натяге $\Delta_{макс}$ данной посадки.

Пример расчета втулки. В качестве примера приведем расчет втулки, запирающей пакет якоря на валу электродвигателя П-92 (см. рис. 9-2).

Данные для расчета: $D_п = 256$ *мм*; $d = 80$ *мм*; $D = 110$ *мм*; $l = 35$ *мм*.

Втулка насажена на вал с натягом горячей посадки второго класса точности по системе отверстия. По ГОСТ 1042 для этой посадки допуски для вала составляют $^{+120}_{+90}$ *мк*, а допуски для отверстия втулки $^{0}_{+30}$ *мк*. Наименьший натяг будет при наименьшем размере вала и наибольшем размере отверстия, т. е. $\Delta_{мин} = 90 - 30 = 60$ *мк*, а наибольший натяг $\Delta_{макс} = 120$ *мк*.

Относительный наименьший натяг

$$\delta_{мин} = \frac{0,060}{80} = 7,5 \cdot 10^{-4}.$$

Относительный наибольший натяг

$$\delta_{макс} = \frac{0,120}{80} = 15 \cdot 10^{-4}.$$

Отношение

$$\alpha = \frac{110}{80} = 1,37.$$

Ввиду того что листы якоря и втулка насажены на один и тот же номинальный диаметр вала, натяг осуществляется за счет минусового допуска на отверстие втулки (система вала).

Удельное давление по (9-21)

$$p = 105 \cdot 10^4 \left[1 - \frac{1}{1,37^2}\right] \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} = = 370 \; кГ/см^2.$$

Сила сцепления втулки с валом по (9-19)

$$P = 370 \cdot 0,1 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 3,5 = 3\,260 \; кГ.$$

Сила, сдвигающая нажимную шайбу, по (9-17)

$$Q = \frac{3,14}{4}(25,6^2 - 8^2) \cdot 5 = 2\,300 \; кГ.$$

Условие надежности

$$\frac{3\,260}{2\,300} = 1,4 > 1,2, \text{ т. е. выполняется.}$$

Проверим напряжение на растяжение втулки по (9-22):

$$\sigma = 105 \cdot 10^4 \left(1 + \frac{1}{1,37^2}\right) \cdot 15 \cdot 10^{-4} = = 2\,400 \; кГ/см^2.$$

Втулка может быть изготовлена из стали марки Ст.45 с пределом текучести 3 400 *кГ/см²*.

Расчет напряжений в листах ротора. Увеличение скоростей вращения асинхронных двигателей за счет повышения частоты и широкая регулировка скорости двигателей постоянного тока привели к необходимости проверять напряжение на внутреннем отверстии листов ротора. Оно определяется по формуле

$$\sigma = AD^2 \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2 \beta, \; кГ/см^2, \quad (9\text{-}23)$$

где D — диаметр ротора, *см*;

β — приближенное значение коэффициента ослабления сечения листа шпоночной канавкой и вентиляционными отверстиями:

$$\beta = \frac{D - 2h_п - d_в}{2h_{мин}};$$

$h_п$ — глубина паза;

$d_в$ — диаметр вентиляционного отверстия;

$h_{мин}$ — минимальная высота спинки ротора, равная:

$$\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - h_{шп} - h_п - d_в;$$

A определяется по кривым на рис. 9-30.

$$\varepsilon = \frac{h_п}{D}; \quad \alpha = \frac{d}{D - 2h_п}.$$

Допускаемое напряжение 1 200 *кГ/см²*.

Пример расчета. Расчет напряжений в листе якоря с размерами по рис. 9-29. Номинальная скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением 3000 *об/мин*. По приложению IX $n_{макс} = 6\,000$ *об/мин*;

$$\varepsilon = \frac{2,6}{24,5} = 0,11; \quad \alpha = \frac{5}{19,3} = 0,26.$$

По графику на рис. 9-30 определяем $A=0{,}022$.

По чертежу листа

$$\beta=\frac{24{,}5-5{,}2-5}{2(12{,}25-2{,}5-0{,}45-2{,}6-2{,}5)}=1{,}7.$$

По (9-23)

$$\sigma=0{,}022\cdot 24{,}5^2\left(\frac{6\,000}{1\,000}\right)^2\cdot 1{,}7=810\ кГ/см^2.$$

Предельное допускаемое напряжение наступит при $n_{макс}=7300$ *об/мин.*

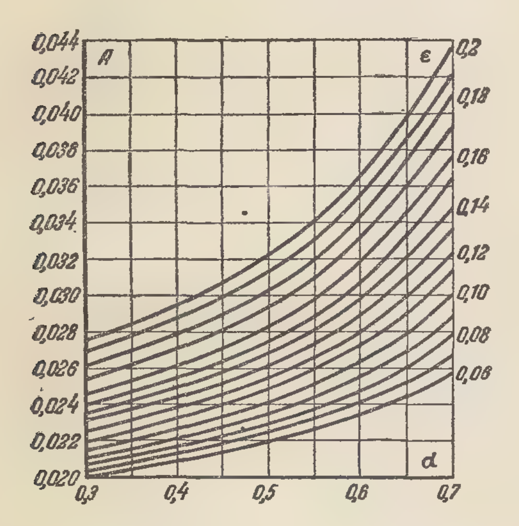


Рис. 9-30. Графики для расчета напряжений в листах.

б) **Расчет пазовых клиньев и бандажей.** В открытых пазах обмотка удерживается клиньями или проволочными бандажами. Для того чтобы бандажи не выступали за окружность якоря, в нем предусматриваются кольцевые канавки, которые образуются путем применения листов меньшего диаметра, чем основные. Глубина канавки примерно равна $d+1{,}5$ *мм*, где d — диаметр проволоки бандажа.

Выбор способа крепления обмотки зависит от ряда соображений. Бандажи занимают меньше места по высоте паза, намотка их механизирована и поэтому требует меньше времени, чем забивка клиньев. Но в витках бандажа создаются дополнительные потери от вихревых токов. Поэтому ширина бандажа на якоре обычно не превышает 25 *мм*. Для равномерного распределения механических напряжений между витками бандажи пропаивают по всей поверхности. Это связано с большим расходом припоя, и поэтому в машинах средней и большой мощности бандажи стоят дороже, чем клинья.

Клинья занимают больше места по высоте паза, но зато они защищают обмотку от загрязнения и механических повреждений по всей длине якоря. На основании этих соображений в практике электромашиностроения бандажи применяют для машин с диаметром якоря до 200—250 *мм*, а в более крупных машинах применяют клинья из твердых пород дерева или прессованных материалов (текстолит, гетинакс, стеклотекстолит).

Лобовые части вращающихся обмоток защищают от деформаций под действием центробежных сил бандажами. Для бандажей применяют специальную стальную проволоку с прочностью на разрыв 180 *кГ/мм*² по ГОСТ 9124-59. Намотку бандажей производят с сильным натяжением проволоки (50—60 *кГ/мм*²), поэтому во избежание изгиба вала выбор диаметра проволоки следует делать с учетом якоря согласно следующей таблице:

Диаметр якоря, *мм* . .	До 200	201—400	401—1000	Свыше 1000
Диаметром проволоки в *мм* . . .	0,5—0,8	1	1,6	2

В последнее время проволочные бандажи стали заменять бандажами из нетканой стеклоленты, пропитанной полиэфирной смолой в полуотвержденном состоянии. Для заделки конца бандажа последний виток нагревают горячим утюгом, ускоряя полимеризацию смолы. После этого отрезают ленту вблизи полимеризованного участка. Опыт эксплуатации показал, что бандажи из стеклоленты надежнее проволочных. Кроме того, в них отсутствуют потери от вихревых токов и они не влияют на коммутацию. Поэтому их применяют даже в таких ответственных и сильно нагруженных машинах, как тяговые двигатели.

Расчеты крепления пазовых и лобовых частей производят раздельно. Все расчеты ведут при угонной

скорости вращения (см. приложение IX).

Расчет пазовых клиньев. Учитывая, что прочность клина и центробежная сила обмотки пропорциональны длине якоря, расчет ведут на

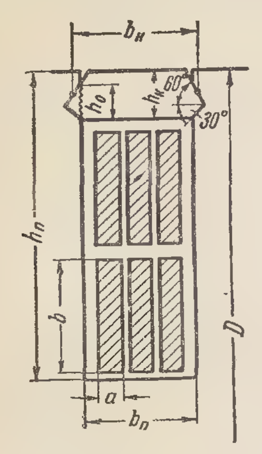


Рис. 9-31. Разрез паза якоря.

1 *пог. см* длины якоря. Клин рассматривают как балку на двух опорах с длиной $b_к$ и равномерно распределенной нагрузкой, работающую на изгиб (рис. 9-31). Вес пазовой части обмотки определяют следующим образом.

Общее сечение меди в пазу

$$F_м = abS_п, \text{ см}^2, \qquad (9\text{-}24)$$

где $S_п$ — число проводников в пазу.

Вес меди на 1 *пог. см* длины якоря

$$G_м = F_м \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/см}. \qquad (9\text{-}25)$$

Вес пазовой изоляции (принимая средний удельный вес равным 2,5 *Г/см³*)

$$G_{из} = (b_п h_п - F_м) \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/см}. \qquad (9\text{-}26)$$

Центробежная сила пазовой части обмотки на 1 *пог. см*

$$C = 5{,}6 (G_м + G_{из}) (D - h_п) \times \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2, \text{ кГ/см}. \qquad (9\text{-}27)$$

Предварительный выбор высоты клина производят по следующей формуле:

$$h_к \geqslant 1{,}22 \sqrt{\frac{b_к C}{\sigma_{доп}}}, \text{ см}. \qquad (9\text{-}28)$$

По соображениям необходимой жесткости высота клина $h_к$ должна быть не менее $0{,}25\ b_к$.

Допускаемое напряжение на изгиб для буковых клиньев равно 60—80 *кГ/см²*, а для клиньев из текстолита или гетинакса 250 *кГ/см²*.

После предварительного выбора клина производят поверочный расчет.

Напряжение на изгиб

$$\sigma = 1{,}5 \frac{Cb_к}{h_к^2}. \qquad (9\text{-}29)$$

Напряжение на срез

$$\tau = 0{,}5 \frac{C}{h_0}. \qquad (9\text{-}30)$$

Допускаемое напряжение на срез для буковых клиньев равно 20 *кГ/см²*, а для клиньев из гетинакса или текстолита 150 *кГ/см²*.

Расчет проволочных бандажей. Вес пазовой части обмотки определяют аналогично предыдущему по (9-25) и (9-26), но не на 1 *пог. см*, а на всю длину якоря, т. е. значения формул умножают на полную длину якоря в сантиметрах.

Вес лобовой части обмотки с одной стороны якоря

$$G_л = 1{,}2 \cdot 0{,}7 \tau abS_п Z \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ кГ}, \qquad (9\text{-}31)$$

где 1,2 учитывает вес изоляции;
$0{,}7\tau$ — длина лобовой части проводника;
Z — число пазов.

Бандаж испытывает напряжение от центробежных сил обмотки и собственного веса σ_0. Суммарное напряжение не должно превышать 3 000 *кГ/см²*:

$$\sigma_0 = 0{,}022 D^2 \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2, \text{ кГ/см}^2. \qquad (9\text{-}32)$$

Число витков бандажа

$$w = 1{,}13 \frac{G (D - h_п)}{d^2 (\sigma_{доп} - \sigma_0)} \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2, \qquad (9\text{-}33)$$

где d — диаметр проволоки, *см*.

При расчете бандажей из стеклоленты сечение бандажа должно быть в 1,8—2 раза больше сечения проволочного бандажа.

Пример расчета клиньев и бандажей. Расчет проведем для якоря генератора П-104 (см. рис. 9-3).

Данные для расчета: $a=4,1$ *мм*, $b=12,5$ *мм*; $D=590$ *мм*; $b_п=11$ *мм*; $h_п=38$ *мм*; $S_п=4$; $2p=6$; $Z=56$; $n_н=1\,000$ *об/мин*; по приложению IX $n_{макс}=1\,250$ *об/мин*;

$$F_м = 0,41 \cdot 1,25 \cdot 4 = 2\ см^2;$$

$$G_м = 2 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 0,018\ кГ/см;$$

$$G_{из} = (1,1 \cdot 3,8 - 2) \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,005\ кГ/см;$$

$$C = 5,6\,(0,018 + 0,005)\,(59 - 3,8) \times \left(\frac{1\,250}{1\,000}\right)^2 = 11\ кГ/см;$$

$$h_к = 1,22\sqrt{\frac{1,4 \cdot 11}{40}} = 0,76\ см;$$

округляем до 7,5 *мм*.

Условие $h_к \geqslant 0,25 b_к \geqslant 0,25 \cdot 1,4 \geqslant 0,35$ выдерживается.

Проверяем напряжение на изгиб

$$\sigma = 1,5 \cdot \frac{11 \cdot 1,1}{0,75^2} = 52\ кГ/см^2.$$

Напряжение на срез

$$\tau = 0,5 \cdot \frac{11}{0,5} = 11\ кГ/см^2.$$

Оба значения для букового клина находятся в допускаемых пределах.

Вес лобовой части обмотки

$$G_л = 1,2 \cdot 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 59}{6} \cdot 0,41 \cdot 1,25 \times 4 \cdot 56 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 27\ кГ;$$

$$\sigma_0 = 0,022 \cdot 59^2 \left(\frac{1\,250}{1\,000}\right)^2 = 120\ кГ/см^2;$$

$$w = 1,13 \cdot \frac{27 \cdot 55}{0,15^2\,(3\,000 - 120)} \left(\frac{1\,250}{1\,000}\right)^2 = 40\ витков.$$

Если расчетное число витков не помещается по длине лобовой части, то приходится прибегать к намотке бандажа в несколько слоев (см. рис. 9-4). Число витков в каждом последующем слое берут на 2—4 меньше, чем в предыдущем, чтобы крайние витки не сползали. Между слоями прокладывают слой асбестовой бумаги для снижения потерь от вихревых токов. Для более равномерного распределения напряжений между слоями каждый последующий слой наматывают с натяжением проволоки, на 10% меньшим, чем предыдущий.

В роторах турбогенераторов вследствие больших окружных скоростей и веса обмотки развиваются огромные центробежные силы. Поэтому в пазах обмотку ротора заклинивают металлическими клиньями. Так, например, в турбогенераторе ТВ2 мощностью 100 000 *квт* (рис. 9-24) в пазы ротора забивают клинья из дюралюминия высотой 36 *мм*. Лобовые части обмотки ротора от деформаций под действием центробежных сил удерживаются массивными бандажными кольцами, которые отковывают из легированной магнитной или немагнитной стали и надевают на лобовые части обмотки в горячем состоянии. При температуре нагрева 230° С внутренний диаметр бандажного кольца увеличивается на 4 *мм* и оно легко надевается на лобовые части. Бандажное кольцо опирается на центрирующее кольцо, насаженное на вал ротора.

Толщина бандажного кольца может быть предварительно взята по рис. 14-35; более точное определение его размеров см. [Л. 114].

в) **Роторы асинхронных двигателей и машин постоянного тока на крестовинах.** При увеличении мощности и числа полюсов машины разность между внутренним диаметром ротора, определямым при электромагнитном расчете, и диаметром вала, определяемым при расчете вала на жесткость, становится значительной, поэтому нецелесообразно насаживать листы непосредственно на вал. В этом случае листы ротора собирают на промежуточной втулке, которая напрессовывается на вал. Ее называют роторной звездой или крестовиной. В старых машинах крестовины отливали из чугуна и они были очень тяжелыми. В современных машинах крестовины почти исключительно выполняют сварными, причем достигнуты большая экономия материала и снижение трудоемкости их изготовления.

Конструкции крестовин в значительной степени определяются тем, собирается ли ротор из целых листов или сегментов. На рис. 9-32 показана конструкция сварной крестовины ротора из целых листов.

Ребра приварены непосредственно к валу и обработаны снаружи под посадку листов. Это самая простая и дешевая конструкция с минимальной механической обработкой. Средняя часть вала может быть необработанной. Однако вследствие влияния сварных швов на структуру стали вала и появления больших концентраций напряжений в сечениях вала у торцов ребер необходима термическая обработка после сварки.

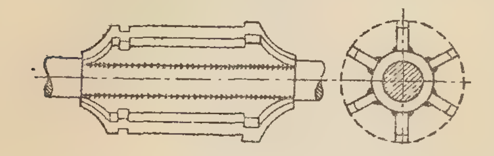


Рис. 9-32. Сварная крестовина ротора.

На рис. 9-33 представлена конструкция роторной звезды асинхронного двигателя 19-го габарита, собранного из сегментов. Она состоит из втулки *1*, к которой приварены три диска *2* с вырезами для циркуляции охлаждающего воздуха. Кроме кольцевых швов, они скреплены со втулкой радиальными ребрами *3*. К дискам и ребрам приварены продольные балки *4*, в которые вставлены шпонки *5*. Сердечник ротора состоит из сегментов *6*, в которых выштамповано по две шпоночные канавки и по два отверстия для стягивающих шпилек. В окружности ротора 12 сегментов. Сегменты соседних слоев сдвинуты на половину их длины. Таким образом, сегменты одного ряда надеваются на шпонку средней канавкой, а сегменты другого ряда надеваются на две шпонки канавками половинной ширины, выштампованными по концам сегмента. К крайним дискам приварены бобышки *8*, на которых центрируются нажимные шайбы *7* с приваренными к ним обмоткодержателями *9*. Сквозь весь сердечник проходят 24 шпильки *10*, которые спрессовывают сердечник ротора.

Аналогично выполняют якоря машин постоянного тока с сегментированными сердечниками. При этом коллектор насаживают не на вал, а на ступицу якорной звезды (см. рис. 9-5) или крепят к ней болтами. Благодаря этому петушки коллекторов не подвергаются деформациям при прогибах вала. Кроме того, такое крепление коллектора позволяет производить обмотку и пропитку якоря без вала и упроща-

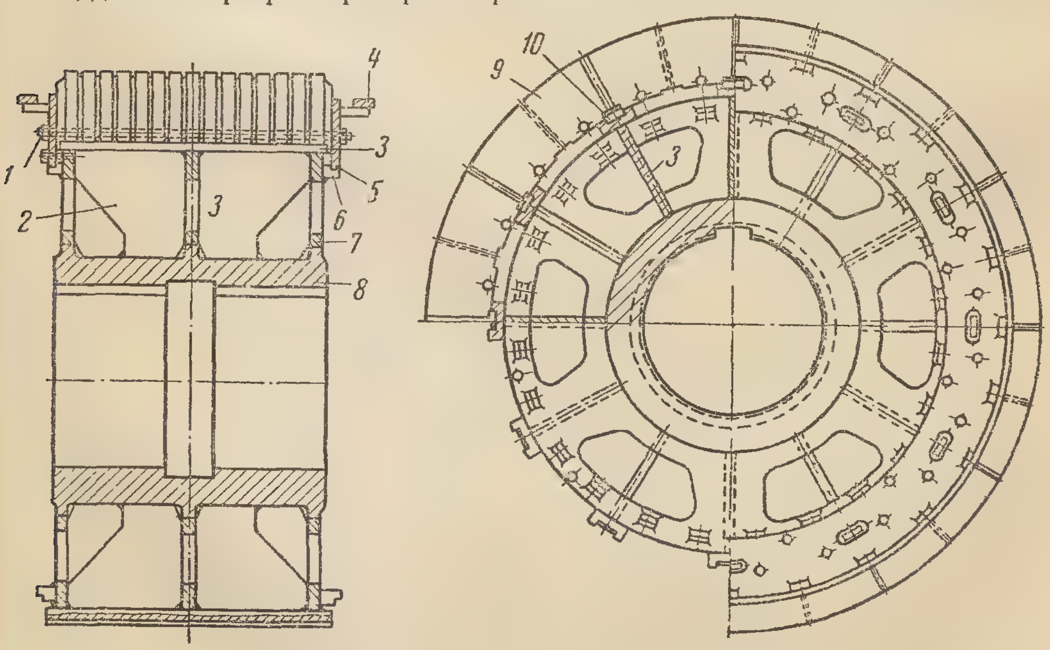


Рис. 9-33. Ротор двигателя 19-го габарита.

ет замену вала в случае его поломки.

Однако для крупных реверсивных машин нельзя обойтись без ласточкина хвоста. В объединении «Электросила» разработана надежная и технологичная конструкция крепления сегментов (рис. 9-34). Выступы *2* в форме ласточкина хвоста выштампованы в сегментах якоря и центрируются при сборке на ребрах *1* якорной звезды. Часть выступов входит в трапецеидальные пазы балок *3* и расклинивается клиньями *4*. Балки *3* после сборки сердечника приваривают к якорной звезде. Таким образом, отпадают требования точной пригонки ласточкина хвоста при сборке. Сердечник спрессовывают шпильками *5*.

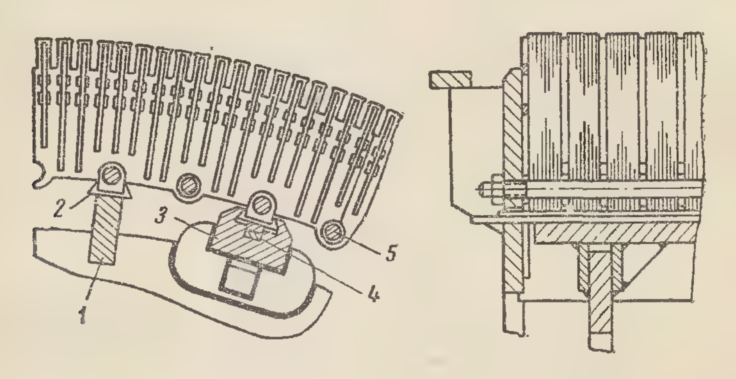


Рис. 9-34. Сегментированный якорь.

Расчет сердечника ротора из сегментов. Среднее растягивающее напряжение в сегменте

$$\sigma = 0{,}022(D-h)^2\left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2 \times$$

$$\times \beta\frac{h}{h_{мин}},\ кГ/см^2, \qquad (9\text{-}34)$$

где D — наружный диаметр ротора, *см*;

D_i — внутренний диаметр ротора, *см*;

$h=\frac{D-D_i}{2}$ — высота сегмента, *см*;

β — коэффициент ослабления сечения в местах стыков;

$\beta=2$ при перекрытии на $^1/_2$ сегмента;

$\beta=1{,}5$ при перекрытии на $^2/_3$ сегмента;

$\beta=1{,}33$ при перекрытии на $^3/_4$ сегмента;

$h_{мин}$ — минимальная высота сегмента:

$$h_{мин}=h-h_п-h_{шп}, \qquad (9\text{-}35)$$

где

$h_п$ — глубина паза;

$h_{шп}$ — глубина шпоночной канавки.

Допускаемое напряжение $\sigma_{доп}=1\,200$ *кГ/см²*.

Расчет прессующих шпилек. Усилие прессовки сердечника

$$P=\frac{\pi}{4}(1-\alpha^2)D^2p,\ кГ, \qquad (9\text{-}36)$$

где $\alpha=D_i/D$;

p — удельное давление от 10 до 20 *кГ/см²* в зависимости от условий работы машины.

Напряжение на растяжение в шпильке

$$\sigma=\frac{4}{\pi}\cdot\frac{P}{md_0^2},\ кГ/см^2, \qquad (9\text{-}37)$$

где m — число шпилек по окружности;

d_0 — внутренний диаметр резьбы.

Учитывая, что, кроме растяжения, шпилька подвергается изгибающим напряжениям под действием центробежной силы сегментов, напряжение на растяжение не должно превышать 800 *кГ/см²*.

Пример расчета. В качестве примера взят ротор с размерами по рис. 9-33: $D=1\,800$ *мм*; $D_i=1\,500$ *мм*; $h=150$ *мм*; $\beta=2$; $h_п=48$ *мм*; $h_{шп}=12$ *мм*.

Среднее растягивающее напряжение в сегменте

$$\sigma = 0{,}022\,(180 - 15)^2 \left(\frac{590 \cdot 1{,}25}{1\,000}\right)^2 \cdot 2 \cdot \frac{15}{9} = 1\,100 \text{ кГ/см}^2.$$

Усилие запрессовки

$$P = \frac{3{,}14}{4}(1 - 0{,}83^2) \cdot 180^2 \cdot 10 = 79\,000 \text{ кГ}.$$

По окружности ротора расположены 24 шпильки М 30; $d_0 = 25$ *мм*.

Напряжение в сечении шпильки

$$\sigma = \frac{4 \cdot 79\,000}{3{,}14 \cdot 24 \cdot 2{,}5^2} = 660 \text{ кГ/см}^2.$$

Всякий шихтованный из сегментов обод ротора или якоря, кроме механической прочности, должен обладать свойством монолитности. Под монолитностью подразумевается отсутствие взаимного перемещения сегментов под действием центробежных сил даже при угонной скорости вращения. В настоящее время монолитность шихтованных ободов достигается чисто механически или путем скрепления сегментов многочисленными шпильками, плотно забиваемыми в выштампованные для них отверстия, или посредством нанизывания сегментов ласточкиным хвостом на ребра ротора. В машинах постоянного тока и особенно в роторах асинхронных двигателей монолитность приобретает большое значение вследствие небольшого зазора между статором и ротором. Сборка сегментов на ребра трапецеидального сечения представляет значительные трудности, так как она требует высокой точности распределения ребер по окружности, причем часто не удается избежать коробления сегментов при сборке.

В последнее время найдены новые конструктивные решения сборки шихтованных сегментов, которые исключают конструктивные и технологические трудности обычных конструкций. Они основаны на использовании силы трения, препятствующей перемещению сегментов. Для обеспечения монолитности обода ротора удельное давление в спрессованном ободе должно быть не менее величины, выражаемой формулой

$$p_0 = k_и \frac{k_b}{k_f} \sigma \frac{a}{S}, \text{ кГ/см}^2, \quad (9\text{-}38)$$

где $k_и$ — коэффициент использования обода;

σ — напряжение в сегменте при угонной скорости, *кГ/см*²;

k_b — коэффициент использования ширины сегмента;

k_f — коэффициент трения между сегментами;

S — длина поверхности прилегания пары сегментов, *мм*;

a — толщина сегмента, *мм*.

Применим эту формулу для ротора, собранного из сегментов толщиной 0,5 и длиной 500 *мм* при перекрытии на $^1/_2$ сегмента, т. е. при $S = 250$ *мм*. Приняв $k_b = 0{,}7$; $k_f = 0{,}35$ и $\sigma = 3\,500$ *кГ/см*², получим:

$$p_0 = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 3500 \cdot \frac{0{,}5}{250} = 7 \text{ кГ/см}^2.$$

Это значит, что при удельных давлениях между сегментами более 10 *кГ/см*² в роторах из стали толщиной 0,5 *мм* возникающие силы трения настолько велики, что шихтованные вполнахлеста ободы можно рассматривать как монолитные, в которых более вероятен разрыв обода по наиболее слабому сечению, чем скольжение сегментов. При этом стягивающие шпильки должны совершенно свободно проходить через выштампованные для них отверстия, а центровка сегментов производится по наружной окружности роторной звезды. Обод собирается на отдельной оправке или калибрах, спрессовывается и растачивается по внутренней окружности для посадки на роторную звезду.

г) **Роторы синхронных машин.** В синхронных машинах малой мощности полюсы крепят винтами ко втулке, насаженной на вал (см. рис. 9-17). Такая конструкция имеет много неудобств. Головки винтов приходится делать утопленными в полюсном башмаке, что увеличивает магнитное напряжение воздушного зазора. Для уменьшения диаметра углублений применяются винты с цилиндрическими или коническими головками, которые трудно предохранить от самоотвертывания. Полюсные катушки при малом токе возбуждения приходится наматывать в несколько слоев из изолиро-

ванных обмоточных проводов. Перемещение витков под действием центробежных сил приводит к нарушению балансировки ротора, а иногда и к замыканиям между витками. Пониженные напряжения возбуждения применяют в таких машинах для того, чтобы снизить число витков и перейти от многослойных катушек к однослойным из голых шин, наматываемых на ребро.

Особенностью синхронных машин малой мощности со статором из целых листов является то, что внутренняя вырубка от статора не используется для ротора, как это имеет место в асинхронных двигателях. В этом отношении представляет интерес конструкция со штампованным ободом ротора и сердечниками полюсов из электротехнической стали, которая остается после штамповки листов статора (рис. 9-35).

Сущность конструкции заключается в том, что из вырубок от штамповки листов статора штампуют листы ротора *1* с числом выступов, равным числу полюсов. У половины листов *2* выступы обрубают на толщину полюсного наконечника. Из отдельных полос стали штампуют полюсные наконечники *3*. Штампованные листы ротора набирают на вал так, что через каждые 5 *мм* листы *1* с высокими выступами чередуются с листами *2* с низкими выступами. После того как ротор набран и спрессован, на полюсы надевают катушки. В образовавшуюся гребенчатую поверхность зашихтовывают пакеты полюсных наконечников толщиной по 5 *мм*. Крепление полюсных наконечников производят, забивая круглые стержни *4* в отверстия, выштампованные в высоких выступах и полюсных наконечниках.

Концы полюсных наконечников получаются зубчатыми, что в магнитном отношении равносильно скосу краев полюсной дуги в машинах обычной конструкции. Такая конструкция роторов применяется для синхронных машин мощностью до 75 *квт*. Преимущество конструкции заключается в том, что вырубки от штамповки листов статора используются в той же машине, что обеспечивает комплектность их применения.

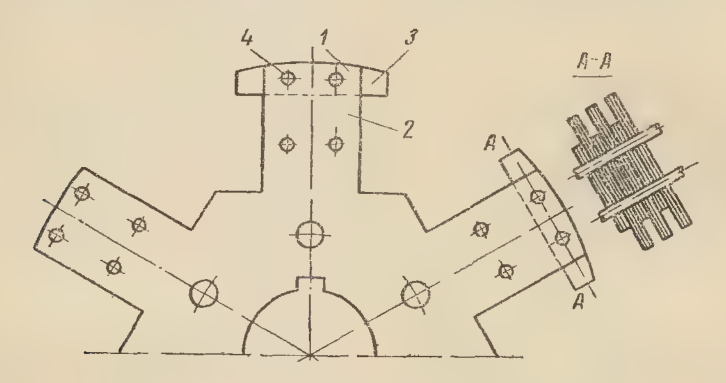


Рис. 9-35. Штампованный ротор синхронной машины.

Тихоходные синхронные машины мощностью в сотни и тысячи киловатт строятся с массивным кованым ободом ротора, приваренным к диску крестовины, и болтовым креплением полюсов (см. рис. 9-19 и 9-20). Такая конструкция позволяет разместить много полюсов на ободе относительно небольшого диаметра. В этом роторе болты ввинчивают в полюсы с внутренней стороны, что устраняет недостатки конструкций малых машин с креплением полюсов винтами. Чтобы избежать сдвигов листов полюса под действием центробежных сил и сделать резьбу для болтов более прочной, в сердечники полюсов впрессованы стержни с резьбой для полюсных болтов. Толщина обода выбирается не только по магнитному и механическому расчетам, но также с учетом необходи-

мого махового момента для создания равномерного вращения ротора при колебаниях нагрузки.

Ниже приводятся механические расчеты сварного обода и полюсных болтов для гидрогенератора ВГС.

Расчет сварной крестовины синхронной машины (рис. 9-36).

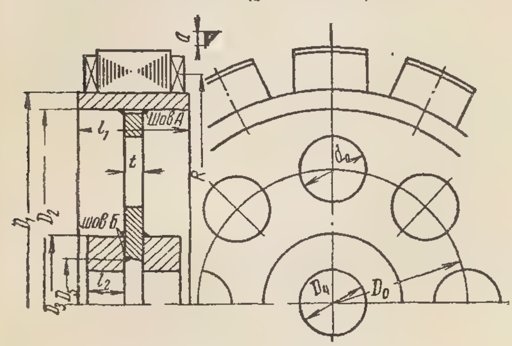


Рис. 9-36. К расчету сварной крестовины.

Обозначения входящих в формулы величин:

Площадь сечения обода F_1, $см^2$.

Площадь сечения ступицы F_2, $см^2$.

Средний радиус обода

$$R_1 = 0{,}25(D_1 + D_2),\ см. \quad (9\text{-}39)$$

Средний радиус ступицы

$$R_2 = 0{,}25(D_3 + D_4),\ см. \quad (9\text{-}40)$$

Расчетная длина спицы

$$l_c = 0{,}5(D_2 - D_3),\ см. \quad (9\text{-}41)$$

Расчетная ширина спицы

$$b_c = \frac{\pi D_0}{m} - d_0,\ см. \quad (9\text{-}42)$$

Число отверстий в диске m.

Площадь сечения спицы

$$F_c = b_c t. \quad (9\text{-}43)$$

Размеры шва A $a_1 \times a_1$, $см^2$.

Размеры шва $Б$ $a_2 \times a_2$, $см^2$.

Вес обода G_1, *кг*.

Вес всех полюсов с катушками $G_п$, *кг*.

Центробежная сила обода

$$C_1 = 11{,}2\, G_1 R_1 \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2,\ кГ. \quad (9\text{-}44)$$

Центробежная сила полюсов с катушками

$$C_п = 11{,}2\, G_п R \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2,\ кГ. \quad (9\text{-}45)$$

Расчетный коэффициент

$$\alpha = 1 + \frac{F_1}{R_1}\left(\frac{R_2}{F_2} + \frac{2\pi}{m}\,\frac{l_c}{F_c}\right). \quad (9\text{-}46)$$

Сила, растягивающая ступицу,

$$N = \frac{C_1 + C_п}{\alpha m}. \quad (9\text{-}47)$$

Сила, передаваемая на втулку,

$$Q = N\,\frac{(D_3 - D_4)\, l_2}{F_2}. \quad (9\text{-}48)$$

Номинальный вращающий момент

$$M = 97\,500\,\frac{P_п}{n},\ кГ \cdot см.$$

Напряжения. *При разгоне* (на растяжение) в ободе без учета спиц

$$\sigma_о = \frac{C_1 + C_п}{2\pi F_1},\ кГ/см^2; \quad (9\text{-}49)$$

во втулке

$$\sigma_{вт} = \frac{mN}{2\pi F_2},\ кГ/см^2; \quad (9\text{-}50)$$

в швах A

$$\sigma_1' = \frac{N}{a_1 b_c}\,\frac{D_0}{D_2},\ кГ/см^2; \quad (9\text{-}51)$$

в швах $Б$

$$\sigma_2' = \frac{mQ}{\pi(D_3 + D_5)\, a_2},\ кГ/см^2 \quad (9\text{-}52)$$

При номинальной скорости вращения напряжения в швах $Б$:

на растяжение

$$\sigma_2 = \sigma_2'\left(\frac{n}{n_{макс}}\right)^2,\ кГ/см^2; \quad (9\text{-}53)$$

на срез

$$\tau_2 = \frac{0{,}45 K_1 M D_3}{a_2\left(D_3^3 - D_5^3\right)},\ кГ/см^2; \quad (9\text{-}54)$$

на срез (приведенное)

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_2^2 + 4\tau_2^2},\ кГ/см^2, \quad (9\text{-}55)$$

K_1 — коэффициент перегрузки (см. стр. 219).

Допускаемые напряжения в ободе и втулке принимают до 1 000 $кГ/см^2$, в швах на растяжение 800 $кГ/см^2$, на срез 450 $кГ/см^2$.

Расчет полюсных болтов. Центробежная сила одного полюса с катушкой

$$C = \frac{C_п}{2p},\ кГ.$$

Число болтов на полюс n.

Внутренний диаметр резьбы

$$d_0 = \sqrt{\frac{4C}{\pi n \sigma_{доп}}}, \ см. \qquad (9\text{-}56)$$

Допускаемые напряжения для болтов из стали Ст.30 1 000 $кГ/см^2$, из стали Ст.35 1 200 $кГ/см^2$.

Пример расчета. Числовые данные: $D_1=1\,900$ *мм*; $D_2=1\,600$ *мм*; $D_3=550$ *мм*; $D_4=280$ *мм*; $D_5=310$ *мм*; $l_1=312$ *мм*; $l_2=100$ *мм*; $D_0=1\,000$ *мм*; $d_0=240$ *мм*; $t=40$ *мм*; $m=6$; $a_1=15$ *мм*; $a_2=15$ *мм*; $G_п=1\,900$ *кГ*; $n=250$ *об/мин*; $n_{макс}=550$ *об/мин*; $P_н=680$ *квт*; $R=1\,050$ *мм*.

$$F_1 = 15 \cdot 31{,}2 = 470 \ см^2;$$

$$F_2 = 13{,}5 \cdot 2 \cdot 10 = 270 \ см^2;$$

$$R_1 = 0{,}25\,(190 + 160) = 87{,}5 \ см;$$

$$R_2 = 0{,}25\,(55 + 28) = 20{,}8 \ см;$$

$$l_c = 0{,}5\,(160 - 55) = 50{,}25 \ см;$$

$$b_c = \frac{3{,}14 \cdot 100}{6} - 24 = 28 \ см;$$

$$F_c = 28 \cdot 4 = 112 \ см^2;$$

$$G_1 = \frac{3{,}14}{4}\,(190^2 - 160^2) \cdot 31{,}2 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 2\,000 \ кГ;$$

$$C_1 = 11{,}2 \cdot 2\,000 \cdot 87{,}5 \left(\frac{550}{1\,000}\right)^2 = 600\,000 \ кГ;$$

$$C_п = 11{,}2 \cdot 1\,900 \cdot 105 \left(\frac{550}{1\,000}\right)^2 = 675\,000 \ кГ;$$

$$\alpha = 1 + \frac{470}{87{,}5}\left(\frac{20{,}8}{270} + \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50{,}25}{6 \cdot 112}\right) = 4;$$

$$N = \frac{600\,000 + 675\,000}{4 \cdot 6} = 53\,000 \ кГ;$$

$$Q = \frac{53\,000\,(55 - 28) \cdot 10}{270} = 53\,000 \ кГ;$$

$$\sigma_0 = \frac{1\,275\,000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 470} = 430 \ кГ/см^2;$$

$$\sigma_{вт} = \frac{6 \cdot 53\,000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 270} = 185 \ кГ/см^2;$$

$$\sigma_1' = \frac{53\,000 \cdot 100}{1{,}5 \cdot 28 \cdot 160} = 800 \ кГ/см^2;$$

$$\sigma_2' = \frac{6 \cdot 53\,000}{3{,}14\,(55 + 31)\,1{,}5} = 800 \ кГ/см^2;$$

$$\sigma_2 = 800\left(\frac{250}{550}\right)^2 = 160 \ кГ/см^2;$$

$$M = 97\,500 \cdot \frac{680}{250} = 265\,000 \ кГ \cdot см;$$

$$\tau_2 = \frac{0{,}45 \cdot 2 \cdot 265\,000}{1{,}5\,(55^3 - 31)^3} \cdot 55 = 70 \ кГ/см^2;$$

$$\tau_{пр} = 1/2\sqrt{160^2 + 4 \cdot 70^2} = 100 \ кГ/см^2;$$

$$C = \frac{675\,000}{24} = 28\,000 \ кГ;$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 28\,000}{3{,}14 \cdot 1\,200 \cdot 2}} = 3{,}9 \ см.$$

По таблице резьб этому значению соответствует ближайшая бо́льшая резьба М 48.

В местах сверления отверстий под болты сечение обода будет ослаблено и составит 320 $см^2$. Однако по формуле (9-49) напряжение в ободе увеличится до 630 $кГ/см^2$, т. е. не выйдет за пределы допускаемого.

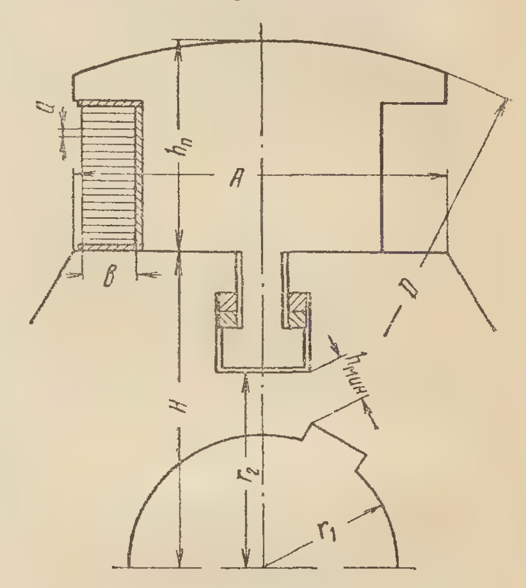
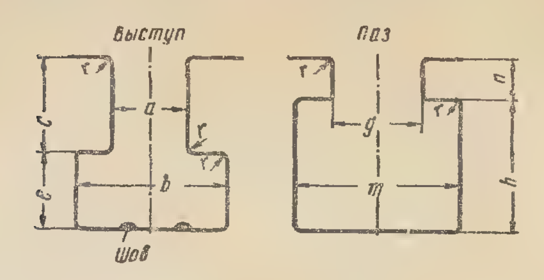


Рис. 9-37. Полюс с Т-образным выступом.

В машинах мощностью свыше 100 *квт* применяется также конструкция ротора с сердечником из штампованных листов с пазами и полюсами, снабженными Т-образными выступами (рис. 9-37). Крепление полюсов производится при помощи тонких клиньев с уклоном 1 : 100, которые попарно забивают в промежутки между пазом и выступом полюса. Для удобства производства размеры пазов и Т-образных выступов нормализованы (табл. 9-5). В случае необходимости полюс выполняют с двумя выступами, расстояние между которыми обозначено в таблице буквой К. Прочность полюсных выступов в сильной степени зависит от толщины листов, а также от накладываемых на нижнюю кромку выступа сварочных швов.

Таблица 9-5

Т-образные выступы полюсов синхронных машин



№ выступа	Размеры выступа, *мм*						Размеры паза, *мм*				Толщина листа, *мм*	Допускаемая нагрузка, *кГ/см*	
	a	*b*	*c*	*e*	*k*	*r*	*g*	*m*	*h*	*n*		Выступ не проварен	Выступ проварен
1	12	24	24	12	—	1	14	26	25	12	0,5	450	600
											1	600	1 000
2	20	40	38	20	—	1,5	22	42	40	20	1	800	1 100
											1,5	1 500	2 000
3	26	52	50	25	80	1,5	29	55	52	25	1	700	1 100
											1,5	2 100	2 800
4	32	65	58	32	98	1,5	35	69	60	32	1	620	1 300
											1,5	2 200	2 900
5	38	70	58	32	110	1,5	42	74	60	32	1	530	1 800
											1,5	2 500	3 400

Преимущество конструкции роторов с Т-образными выступами заключается в большей надежности и снижении трудоемкости, особенно когда пазы в ободе ротора не фрезеруют, а штампуют в тонких листах.

Расчет крепления полюсов Т-образными выступами. Расчет прочности полюса производится путем сопоставления нагрузки на шейку выступа с допускаемыми нагрузками по табл. 9-5. Поскольку центробежные силы и прочность полюса пропорциональны длине машины, расчет ведут на 1 *пог. см*. Обозначения расчетных величин приведены на рис. 9-37.

Средний радиус полюса

$$R = H + 0{,}5h_п, \; см. \qquad (9\text{-}57)$$

Вес меди катушки на 1 *см* длины

$$G_м = 2abw \cdot 8{,}9 \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-3} = 18{,}7abw \cdot 10^{-3}, \; кГ/см; \qquad (9\text{-}58)$$

коэффициент 1,05 учитывает вес изоляции.

Вес полюса на 1 *см* длины

$$G_с = S \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3}, \; кГ/см, \qquad (9\text{-}59)$$

где S — площадь полюса с полюсным башмаком, *см*^{2}.

Центробежная сила полюса с катушкой на 1 *см* длины

$$C = 11{,}2\,(G_м + G_с) \times \times R \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2, \; кГ/см. \qquad (9\text{-}60)$$

По полученным расчетным данным можно выбрать тип выступа по табл. 9-5.

Расчет ротора из целых листов. Расчет производят для проверки напряжения в листах.

Отношение

$$\alpha = \frac{r_1}{r_2}. \qquad (9\text{-}61)$$

Коэффициент для учета напряжений от центробежных сил

$$T = 72{,}4\,(1 + 0{,}212\alpha^2) \cdot 10^{-3}. \qquad (9\text{-}62)$$

Вес зоны выступов на 1 *см* длины

$$G_в = (AHp - \pi r_2^2) \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} кГ/см. \qquad (9\text{-}63)$$

Центробежная сила зоны выступов

$$C_в = 11{,}2 G_в \frac{H + r_2}{2} \times \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2, кГ/см. \qquad (9\text{-}64)$$

Среднее радиальное напряжение на поверхности дна паза

$$\sigma_1 = \frac{2pC + C_в}{2\pi r_2}, \; кГ/см^2. \qquad (9\text{-}65)$$

Тангенциальное напряжение в сечении ротора

$$\sigma_2 = \frac{2}{1 - \alpha^2}\sigma_1 + + Tr_2^2 \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2 кГ/см^2. \qquad (9\text{-}66)$$

Напряжение с учетом ослабления сечения шпоночной канавкой

$$\sigma_3 = \sigma_2 \frac{r_2 - r_1}{h_{мин}}. \qquad (9\text{-}67)$$

Допускается 1 200 $кГ/см^2$ для Ст.3.

Пример расчета. $D = 800$ *мм*; $2p = 6$; $S = 250$ $см^2$; $H = 240$ *мм*; $h_п = 160$ *мм*; $a = 3{,}8$ *мм*; $b = 32$ *мм*; $w = 25$; $n_{макс} = 1\,500$ *об/мин*; $r_2 = 148$ *мм*; $r_1 = 100$ *мм*; $h_{мин} = 40$ *мм*; $A = 280$ *мм*; $l = 160$ *мм*; $L = 270$ *мм*; $r = 30$ *мм*.

$$R = 24 + 8 = 32 \; см;$$

$$G_м = 18{,}7 \cdot 0{,}38 \cdot 3{,}2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 0{,}57 \; кГ/см;$$

$$G_с = 250 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}95 \; кГ/см;$$

$$C = 11{,}2\,(0{,}57 + 1{,}95) \times 32 \left(\frac{1\,500}{1\,000}\right)^2 = 2\,000 \; кГ/см.$$

Согласно табл. 9-5 для этой машины можно применить Т-образный выступ № 4 при толщине листа 1,5 *мм* без проварки основания выступа:

$$\alpha = \frac{10}{14{,}8} = 0{,}67;$$

$$T = 72{,}4\,(1 + 0{,}212 \cdot 0{,}67^2) \cdot 10^{-3} = 0{,}08;$$

$$G_в = (28 \cdot 24 \cdot 3 - 3{,}14 \cdot 14{,}8^2) \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 10 \; кГ/см;$$

$$C_в = 11{,}2 \cdot 10 \cdot \frac{24 + 14{,}8}{2}\left(\frac{1\,500}{1\,000}\right)^2 = 4\,850 \; кГ/см;$$

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot 2\,000 + 4\,850}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 14{,}8} = 180 \; кГ/см^2;$$

$$\sigma_2 = \frac{2}{1 - 0{,}67^2} \cdot 180 + + 0{,}08 \cdot 14{,}8^2 \left(\frac{1\,500}{1\,000}\right)^2 = 690 \; кГ/см^2;$$

$$\sigma_3 = 690 \cdot \frac{14{,}8 - 10}{4} = 830 \; кГ/см^2.$$

Расчет распорок между катушками. Катушки синхронных машин под действием центробежной силы стремятся выгнуться в междуполюсное пространство. Напряжение на изгиб в медной шине катушки определяют по формуле

$$\sigma = 0{,}05\left(\frac{2r + l}{2b}\right)(2r + L)^2 \times \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2 K, \; кГ/см^2 \qquad (9\text{-}68)$$

где l — ширина прямолинейной части катушки (рис. 9-38);
L — длина прямолинейной части катушки;
r — радиус закругления катушки по средней линии.

Значение коэффициента K определяют по следующей формуле:

$$K = \frac{3\pi\mu^3 + 6(\pi - 1)\mu^2 + 6\mu + 1}{(\pi\mu + 1)(2\mu + 1)^2}, \qquad (9\text{-}69)$$

$$\mu = \frac{r}{L} \qquad (9\text{-}70)$$

Если напряжение превосходит 500 $кГ/см^2$, то надо ставить распорки между катушками (см. рис. 5-16).

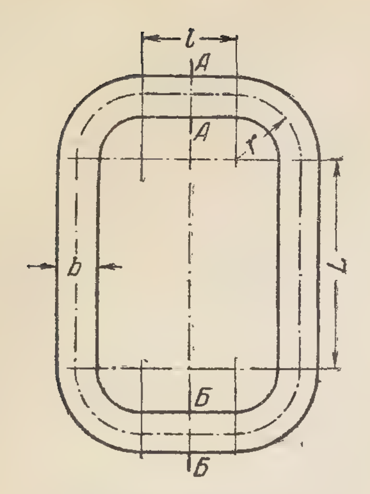


Рис. 9-38. К расчету катушки полюса.

Число распорок определяют по формуле

$$m=\sqrt{\frac{\sigma}{500}}-1. \qquad (9\text{-}71)$$

Пример расчета. Расчет проведем для катушки ротора, размеры которого были приведены в предыдущем расчете.

$$\mu=\frac{30}{270}=0{,}11;$$

$$K=$$

$$=\frac{3\cdot 3{,}14\cdot 0{,}11^3+6(3{,}14-1)\cdot 0{,}11^2+6\cdot 0{,}11+1}{(3{,}14\cdot 0{,}11+1)\,(2\cdot 0{,}11+1)^2}=$$

$$=0{,}9;$$

$$\sigma=0{,}05\cdot\frac{22}{2\cdot 3{,}2}\cdot 33\left(\frac{1\,500}{1\,000}\right)^2\cdot 0{,}9=$$

$$=380\ \textit{кГ/см}^2.$$

Следовательно, в данной машине можно обойтись без распорок между катушками.

В быстроходных машинах следует также проверить напряжение в кромке полюсного башмака, особенно при наличии в нем успокоительной или пусковой обмотки.

Изгибающий момент, условно отнесенный к сечению *ББ* (рис. 9-39),

$$M=C_{\text{м}}l_0+C_{\text{к}}l_{\text{к}}, \qquad (9\text{-}72)$$

где $C_{\text{м}}$ — центробежная сила обмотки на 1 *см* длины;

$C_{\text{к}}$ — центробежная сила кромки полюса на 1 *см* длины.

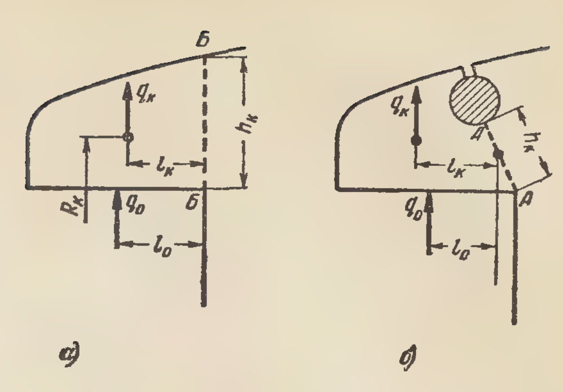


Рис. 9-39. К расчету кромки полюса.

Напряжение на изгиб кромки

$$\sigma=\frac{6M}{h_{\text{к}}^2}. \qquad (9\text{-}73)$$

Допускаемые напряжения на изгиб кромки полюсного башмака без успокоительной обмотки при толщине листов 1 *мм* 700 *кГ/см*² и при толщине листов 1,5 *мм* 1 000 *кГ/см*². При наличии успокоительной обмотки допускаемые напряжения соответственно будут 900 и 1 300 *кГ/см*².

Для полюса, изображенного на рис. 9-39,

$$M=450\cdot 1{,}6+100\cdot 1{,}5=870\ \textit{кГ}\cdot\textit{см};$$

$$\sigma=\frac{6\cdot 870}{4^2}=330\ \textit{кГ/см}^2.$$

В машинах средней мощности радиальная высота обода ротора может оказаться недостаточной для размещения паза Т-образной формы. В таких случаях применяют полюсы с трапецеидальным хвостом (рис. 9-40) с боковыми клиньями.

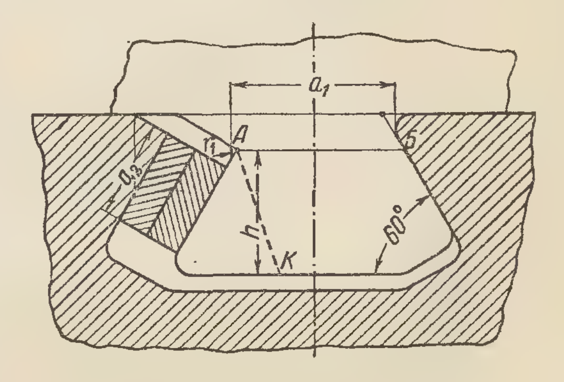


Рис. 9-40. Полюс с трапецеидальным хвостом.

Напряжение на растяжение в сечении *АБ* с учетом концентрации напряжений в углах

$$\sigma_р = 1{,}65\,\frac{C}{a_1}. \qquad (9\text{-}74)$$

Сила, нормальная к боковой поверхности хвоста при угле 60°,

$$F = \frac{C}{2\cos 60^\circ} = C. \qquad (9\text{-}75)$$

Напряжение клина на смятие

$$\sigma_{см} = \frac{C}{a_2}. \qquad (9\text{-}76)$$

Напряжение на изгиб в сечении *АК*

$$\sigma_{из} = 1{,}86\,\frac{C}{h},\ кГ/см^2. \qquad (9\text{-}77)$$

В конструкции, приведенной на рис. 9-40, пазы в остове ротора несимметричны из-за бокового расположения клиньев. Поэтому в более крупных машинах прибегают к расположению клиньев под ласточкиным хвостом (рис. 9-41). В этом случае применяют массивные полюсы,

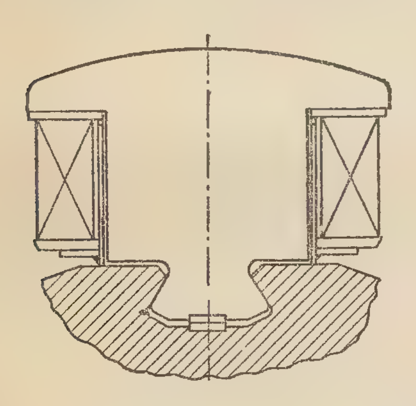


Рис. 9-41. Полюс с массивным наконечником.

изготовленные из стали методом литья или поковки. Расположение клиньев внизу повышает сопротивление магнитопровода, так как между опорными поверхностями полюса и остова ротора образуются зазоры порядка 0,5—1 *мм*. Но массивные полюсы избавляют от необходимости делать успокоительные обмотки в полюсных башмаках генераторов и пусковые обмотки в полюсных башмаках двигателей.

Применяют также конструкции, в которых массивные полюсные наконечники изготовляют отдельно и привинчивают винтами к сердечнику полюса.

д) **Расчет махового момента ротора.** Маховый момент (момент инерции) ротора является одним из важных параметров машины. В синхронных генераторах и особенно в гидрогенераторах и дизельных генераторах маховой момент должен быть большим для обеспечения равномерности вращения при колебаниях нагрузки и вращающего момента. Наоборот, в двигателях при большой частоте пусков маховой момент должен быть минимальным, так как на разгон ротора часто затрачивается больше энергии, чем на приводной механизм, и это снижает динамические качества привода и повышает нагрев двигателя. Поэтому для каждой спроектированной машины должен быть подсчитан маховой момент ротора.

Для расчета махового момента ротор разбивают на отдельные элементы и определяют маховой момент для каждого из них.

Общая формула для махового момента

$$GD^2 = \sum G_i D_i^2, \qquad (9\text{-}78)$$

где G_i — вес составляющих элементов, *Т*;

D_i — диаметры окружностей, на которых расположены центры тяжести их сечений, *м*.

Для толстостенных цилиндров, как, например, обод ротора, сердечник ротора, коллектор и др., более точные результаты дает формула

$$GD^2 = 0{,}5G(D^2 + d^2). \qquad (9\text{-}79)$$

Для учета влияния пазов расчетный наружный диаметр ротора определяют по формуле

$$D_р = D - 0{,}7h_п, \qquad (9\text{-}80)$$

где $h_п$ — глубина паза.

Маховой момент вала можно определить по формуле

$$GD^2 = 0{,}5Gd_c^2. \qquad (9\text{-}81)$$

Маховой момент выражается в $Т \cdot м^2$ и рассчитывается с точностью

$\pm 10\%$. При расчете надо более внимательно относиться к элементам ротора, расположенным ближе к наружной окружности, так как они оказывают наибольшее влияние на величину махового момента.

Пример расчета. Расчет махового момента проведен для ротора гидрогенератора ВГС (см. рис. 9-20), размеры которого даны на рис. 9-36.

Маховой момент катушек с полюсами

$$GD^2 = 1,9 \cdot 2,1^2 = 8,4\ T \cdot м^2.$$

Маховой момент обода ротора по (9-79)

$$GD^2 = 0,5 \cdot 2\,(1,9^2 + 1,6^2) = 6,16\ T \cdot м^2.$$

Маховой момент диска по (9-79) без учета отверстий

$$GD^2 = 0,5 \cdot 0,62\,(1,6^2 + 0,31^2) = 0,82\ T \cdot м^2.$$

Маховой момент ступицы

$$GD^2 = 0,5 \cdot 0,26\,(0,55^2 + 0,28^2) = 0,05\ T \cdot м^2.$$

Маховой момент вала по (9-81)

$$GD^2 = 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,25^2 = 0,05\ T \cdot м^2.$$

Общий маховой момент ротора

$$GD^2 = 8,4 + 6,16 + 0,82 + + 0,05 + 0,05 = 15,58\ T \cdot м^2.$$

По каталогу маховой момент ротора этого генератора составляет 15 $T \cdot м^2$. Расчетное значение махового момента отличается от каталожного всего на $+4\%$. Точность была бы еще большей, если бы учитывались отверстия в диске.

Маховой момент полюсов с катушками и обода составляет 97% общего махового момента ротора. Между тем маховой момент даже такой тяжелой детали, как вал, составляет ничтожный процент общего махового момента. Поэтому при некотором опыте можно маховой момент определять очень быстро, не учитывая второстепенных элементов в его составе.

9-9. КОЛЛЕКТОРЫ

а) **Типы коллекторов.** Коллектор представляет собой одну из наиболее сложных частей электрической машины. Это объясняется, во-первых, структурой кольца, составленного из большого количества медных пластин, чередующихся с миканитовыми прокладками, во-вторых, сложными геометрическими формами сопряжения металлических и изоляционных деталей, какими являются стальные нажимные конусы, миканитовые манжеты и медные ласточкины хвосты коллекторных пластин, и, наконец, силовыми явлениями, развивающимися под действием центробежных сил и температурных удлинений. Во избежание сильного искрения под щетками биение коллектора в собранной машине, измеряемое индикатором после вращения якоря с разгонной скоростью, должно быть не более 0,03 *мм* для средних коллекторов и 0,04 *мм* для крупных коллекторов. Поскольку индикатор измеряет двойной эксцентриситет, величина эксцентриситета коллектора не должна превышать соответственно 0,015 и 0,02 *мм*. Это предъявляет строгие требования к конструкции и технологии изготовления коллектора.

Коллекторы электрических машин по конструкции и технологии изготовления можно разделить на следующие основные типы:

коллекторы со стальными корпусами;

коллекторы быстроходных машин с бандажными кольцами;

коллекторы на пластмассе.

В практике электромашиностроения применяется большое количество разновидностей конструкций коллекторов, которые описаны в специальной литературе [Л. 8, 68, 72 и 73]. В этой главе рассматриваются лишь конструкции типовых коллекторов.

б) **Коллекторы со стальными корпусами.** На рис. 9-42 показана конструкция коллектора машины постоянного тока средней мощности. Он состоит из пластин *4* твердотянутой меди клинообразного сечения и изоляционных прокладок *8* из специального коллекторного миканита, которые изолируют медные пластины друг от друга. Для изоляции всех пластин от корпуса служат прессованные из миканита манжеты *3* и миканитовый цилиндр *5*. Пластины удерживаются двумя стальными конусами *1* и *7*, надетыми на втулку *6* и стянутыми гайкой *2*, предохраняемой от самоотвертывания стопорным винтом *9*. Для вкладывания проводников обмотки якоря в пластинах коллектора профрезерованы прорези.

Принцип конструкции коллектора основан на том, что посредством усилий, создаваемых стальными конусами, пластины коллектора прижимаются одна к другой и между ними создается боковое давление,

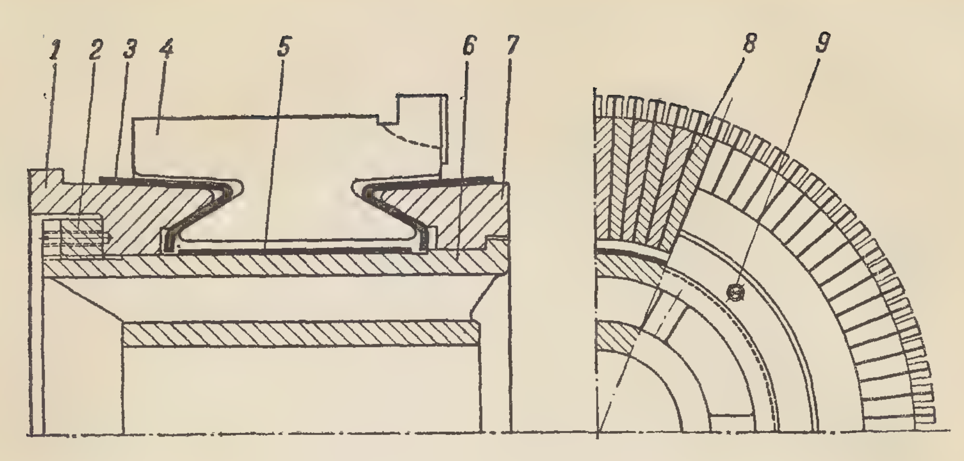


Рис. 9-42. Коллектор арочного типа.

которое называют **арочным распором**. Поэтому такая конструкция коллектора называется арочной. Как видно на рис. 9-42, верхняя сторона конической выточки в пластинах разгружена от усилий, так как между пластинами и манжетами предусмотрен зазор около 0,5 *мм*. Арочные коллекторы применяются диаметром до 3 *м*. Они вытеснили применявшиеся ранее в крупных машинах коллекторы клинового типа, у которых стальные конусы (изолированные манжетами) вклинивались в выточки коллекторных пластин.

Коллекторы с длиной пластин более 200 *мм* нельзя выполнять с затяжкой нажимных конусов круглой гайкой. Если бы пластины были заперты на втулке гайкой, то при нагревании они коробились бы и цилиндрическая поверхность коллектора превратилась бы в «бочку». Поэтому коллекторы крупных машин стягивают стальными шпильками с навернутыми на них шестигранными гайками (рис. 9-43). Ввиду большой разности диаметров якоря и коллектора в коллекторные пластины *1* впаяны медные полоски *2*, называемые петушками, с хомутиками на концах для вкладывания проводников обмотки якоря. Нажимные конусы *4* изолированы миканитовыми манжетами *3* и центрируются на заточках втулки коллектора *7*. Конусы стянуты стальными шпильками *5*. При нагревании коллектора пластины его удлиняются и передают давление на шпильки, которые при этом вытягиваются. После охлаждения коллектора пластины и шпильки снова укорачиваются. Таким образом, шпильки играют

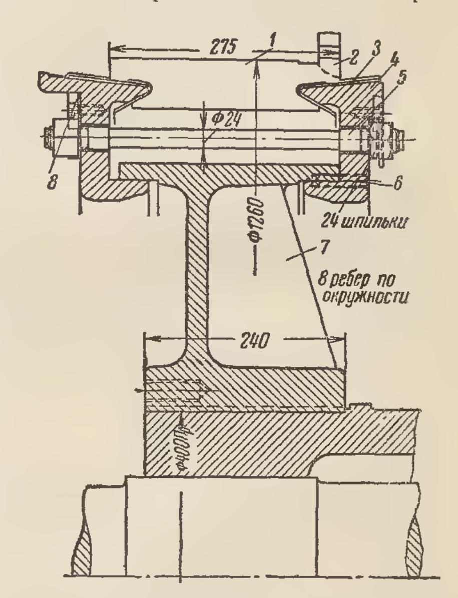


Рис. 9-43. Коллектор со стяжными шпильками.

роль пружин, которые всегда держат пластины в зажатом состоянии. Втулка *7* насажена не на вал, а на продолжение втулки якоря. Это сделано для того, чтобы прогиб вала не передавал деформаций на петушки коллектора. Кроме того, такая конструкция позволяет при замене вала спрессовать якорь с коллектором,

не распаивая соединений петушков коллектора с проводниками обмотки. К торцевым поверхностям нажимных конусов привертывают болтами стальные пластинки *8*, служащие балансировочными грузами. Задний нажимной конус прикреплен ко втулке шпильками *6*, а передний может передвигаться вдоль втулки при подтягивании гаек.

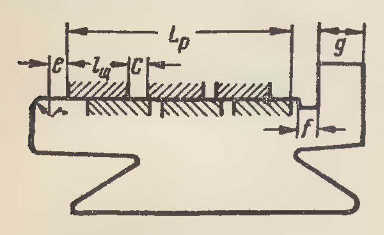


Рис. 9-44. К расчету длины коллектора.

В низковольтных машинах расход меди для коллектора превышает вес обмотки якоря, причем много меди идет в отходы. Значительную экономию меди дает замена твердотянутых полос меди прессованными из порошков металлокерамическими пластинами. При этом можно токоведущую часть пластины получать из медного, а конструктивные ее части — из железного порошка, которые спекаются при прессовании.

Определение длины коллектора. Коллектор имеет сложную форму и конструирование его встречает у студентов много трудностей. Поэтому ниже подробно излагается ход конструирования коллектора.

Выбрав диаметр коллектора, приступают к определению его длины. Во всех машинах, кроме микродвигателей, по длине коллектора устанавливают несколько щеток, вставленных в обоймы щеткодержателей. Для равномерного изнашивания коллектора щетками вся образующая рабочей поверхности коллектора должна перекрываться щетками таким образом, чтобы на каждой кольцевой дорожке стояло одинаковое число положительных и отрицательных щеток. Это объясняется тем, что положительные щетки несколько сильнее изнашивают поверхность коллектора, чем отрицательные, вследствие явления электролиза, при котором происходит перенос медных частиц пластины на щетку. Исходя из этого, длину рабочей поверхности коллектора можно определить по следующей формуле (рис. 9-44):

$$L_р=l_щ n+c(n-1)+(c+2),\ мм, \quad (9\text{-}82)$$

где $l_щ$ — длина щетки, *мм*;

n — число щеток на щеточном пальце;

c — расстояние между соседними щетками, *мм*;

$(c+2)$ — сдвиг щеток, *мм*.

Расстояние между соседними щетками, очевидно, будет включать в себя две толщины стенки обоймы щеткодержателя и зазор между соседними щеткодержателями. Толщина стенки обоймы штампованных щеткодержателей составляет 1,2—1,5 *мм*, а литых щеткодержателей 2—3 *мм*.

Зазор между щеткодержателями должен перекрывать допуск на изготовление обоймы. Для штампованных и литых под давлением щеткодержателей зазор можно принять 1—1,5 *мм*, а для щеткодержателей, отливаемых в земляные формы, 2—2,5 *мм*.

Сдвиг между щетками, расположенными на разных щеточных пальцах, состоит из расстояния между соседними щетками и перекрытия, обеспечивающего отсутствие на коллекторе кольцевых дорожек, не покрытых щетками. Величину перекрытия принимают около 2 *мм*. Таким образом,

$$L_р = l_щ n + c(n-1) + (c+2) = n(l_щ + c) + 2\ мм. \quad (9\text{-}83)$$

Полная длина коллектора (рис. 9-44)

$$L = L_р + r + 2e + f + g,\ мм, \quad (9\text{-}84)$$

где r — радиус скругления коллекторных пластин, *мм*;

f — ширина канавки, *мм*;

e — расстояние крайней щетки до закругления и до канавки, *мм*;

g — ширина петушка коллекторной пластины, *мм*.

Закругление коллекторных пластин радиусом r делают для того, чтобы устранить углы пластин, с ко-

торых может происходить переброс электрической дуги на стальной нажимной конус, сопровождаемый пробоем выступающего края миканитовой манжеты. Это явление объясняется насыщенностью окружающего коллектор пространства щеточной пылью и ионизацией за счет искрения под щетками. Величина радиуса составляет от 2 до 5 *мм* и должна быть тем большей, чем выше напряжение и мощность машины и чем труднее условия коммутации, особенно при переходных процессах (пуск, торможение). Расстояние e должно обеспечивать отсутствие свешивания краев щеток при осевой игре якоря и неточностях сборки щеточного аппарата машины. В машинах с подшипниками качения величину e берут около 2 *мм*, а в машинах с подшипниками скольжения это расстояние следует брать 4—5 *мм*.

Канавка на коллекторе предназначается для выхода камня при шлифовке коллектора и фрезы при его продороживании. Ширину канавки обычно берут 3—5 *мм*. Однако иногда приходится брать ее значительно большей (в машинах с ленточными петушками) для удаления кронштейна щеткодержателей от петушков.

Ширина петушка g определяется плотностью тока в контакте между проводником обмотки и коллекторной пластиной. Для надежной работы контакта плотность тока не должна превышать 0,5—0,7 *а/мм²*. Превышение этих значений при пайке мягкими припоями часто приводит к распаиванию соединения и выбрызгиванию припоя.

Плотность тока для проводников круглого сечения определяется как

$$\Delta_к = \frac{i_a}{\pi d g}, \quad а/мм^2; \qquad (9\text{-}85)$$

а для проводников прямоугольного сечения

$$\Delta_к = \frac{i_a}{(a + 2b) g}, \quad а/мм^2, \qquad (9\text{-}86)$$

где i_a — ток параллельной ветви обмотки якоря;
d — диаметр проводника, *мм*;
b — бóльшая сторона сечения прямоугольного проводника, *мм*;
a — меньшая сторона сечения прямоугольного проводника, *мм*;
g — ширина петушка, *мм*.

Если коллектор имеет впаянные петушки, то проводники обмотки якоря замыкаются в головках петушков и контакт петушка с пластиной находится под током только в момент, когда данная пластина пробегает под щеткой. Поэтому ток, протекающий по петушку, определяют по формуле

$$I_0 = \frac{2I_a}{K}\sqrt{\frac{360^0}{2p\beta}}, \qquad (9\text{-}87)$$

где I_a — ток якоря;
K — число коллекторных пластин;
$2p$ — число щеточных пальцев;
β — ширина щетки в градусах.

При конструировании коллектора необходимо проверить толщину щечки коллекторной пластины δ, которая должна быть:

не меньше 0,75 *мм* при глубине прорези до 10 *мм*;

не меньше 0,8 *мм* при глубине прорези до 20 *мм*;

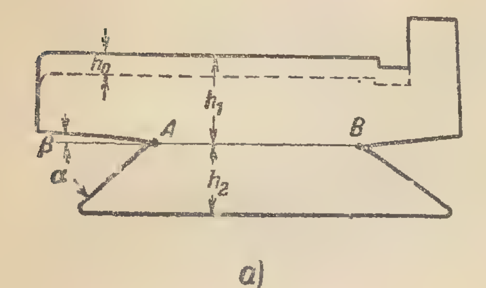
не меньше 0,85 *мм* при глубине прорези выше 20 *мм*.

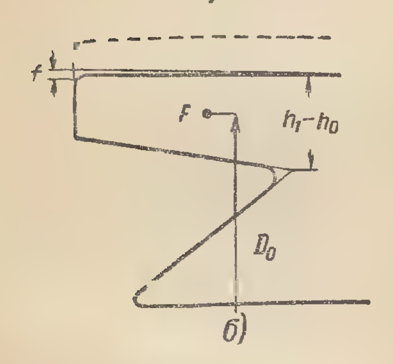
Конструирование коллектора. После определения длины и диаметра коллектора приступают к конструированию, которое начинается с определения размеров коллекторной пластины в продольном разрезе (рис. 9-45, *а*). Конструирование сопровождается ориентировочными расчетами. Сначала надо наметить точки A и B, которые лежат на горизонтальной прямой и отстоят от концов пластины на расстоянии от $^1/_3$ длины пластины (для коротких коллекторов) до $^1/_6$ (для длинных коллекторов). Расстояние h_1 от образующей коллектора до линии AB определяют, исходя из следующих соображений. За время работы машины коллектор подвергается периодическим обточкам и шлифовкам. При проектировании коллектора задаются запасом на износ коллектора h_0, который выбирают в зависимости от диаметра коллектора согласно табл. 9-6.

Таблица 9-6

Величина запаса на срабатывание коллектора на одну сторону, *мм*

Диаметр коллектора, *мм*	Запас на срабатывание, *мм*
До 100	6
От 101 до 250	8
От 251 до 600	10
От 601 до 1 000	12
Свыше 1 000	15





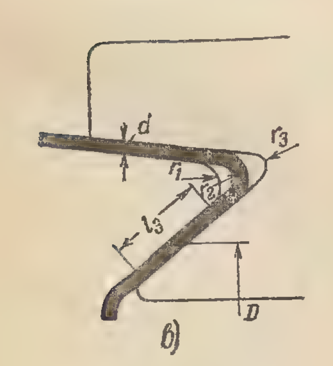


Рис. 9-45. К расчету коллектора.

Расстояние h_1—h_0 определяется жесткостью выступающего конца коллекторной пластины, которая по мере изнашивания коллектора уменьшается. При этом надо учитывать, что вес выступающего конца уменьшается почти пропорционально износу, а момент инерции основания выступа — пропорционально третьей степени его высоты.

Расчет h_1—h_0 производят путем определения прогиба выступающего конца пластины, принимая его как балку с заделанным концом и равномерно распределенной нагрузкой (рис. 9-45, *б*).

Нагрузка представляет собой центробежную силу выступа при угонной скорости вращения (см. приложение IX). Центробежную силу определяют по формуле

$$C = 11{,}2GR_0\left(\frac{n_{\text{макс}}}{1\,000}\right)^2, \qquad (9\text{-}88)$$

где вес выступа

$$G=F\left(\frac{\pi D_0}{K}-s\right)8{,}9\cdot10^{-3} \quad кГ; \qquad (9\text{-}89)$$

F — площадь боковой поверхности выступа, *см*^{2};
K — число коллекторных пластин;
D_0 — диаметр окружности центра тяжести, *см*;
s — толщина миканитовой прокладки, *см*;
8,9 — плотность меди, *г/см*^{3};
R_0 — радиус центра тяжести, равный $D_0/2$.

Прогиб конца выступа коллекторной пластины

$$f=\frac{Cl^3}{8EJ}, \ см, \qquad (9\text{-}90)$$

где l — длина выступа, *см*;
E — модуль упругости первого рода для меди $1{,}15\cdot10^6$, *кГ/см*^{2};
I — момент инерции основания выступа:

$$J=\frac{(h_1-h_0)^3\,t}{12}, \ см^4. \qquad (9\text{-}91)$$

Здесь t — средняя толщина основания;

$$t=\frac{\pi D_0}{K}-s, \ см.$$

Величина прогиба f должна быть не более 0,002 *см*, так как иначе будет наблюдаться недопустимое искажение цилиндрической формы коллектора.

Определив высоту h_1, от точек A и B (рис. 45, a) проводят линии под углом β к горизонтали. Уклон нужен для того, чтобы миканитовую манжету можно было вынуть из пресс-формы. В большинстве случаев он берется равным 3°. В коллекторах с большой длиной бокового выступа угол β берут равным 6°.

Часть коллекторной пластины с высотой h_2 не является активной и служит для удерживания коллекторной пластины, которая стремится под действием центробежной силы при вращении коллектора сдвинуться.

От точек A и B проводят линии под углом α к горизонтали. Угол α почти всегда 30° и только в самых маленьких коллекторах его принимают 45°.

Полученный острый угол $\alpha+\beta$ необходимо скруглить. Радиус r_3 скругления определяется следующим образом (рис. 9-45, $в$). Исходной величиной является внутренний радиус манжеты r_0, который берут не менее толщины манжеты во избежание появления трещин. Очевидно, что внешний радиус манжеты

$$r_2 = r_0 + d.$$

Радиус r_3 должен быть меньше, чем r_2, на 1—1,5 *мм*, чтобы между миканитовой манжетой и пластиной остался зазор. Наоборот, радиус закругления r_1 стального нажимного конуса должен быть на 1 *мм* больше, чем r_0, чтобы угол конуса не прорезал манжеты.

Центробежная сила пластины передается на поверхность прилегания пластины к нажимному конусу через миканитовую манжету. Если полную центробежную силу коллекторной пластины обозначим через C, подсчитав ее по формуле, аналогичной формуле (9-88), то сила, действующая на поверхность прилегания к одной манжете, будет составлять примерно 0,5 C.

Поверхность прилегания F_1 определится как произведение линии прилегания l_3 на среднюю толщину пластины (рис. 9-45, $в$):

$$F_1 = \left(\frac{\pi D}{K} - s\right) l_3, \ см^2. \quad (9\text{-}92)$$

Удельное давление пластины на миканитовую манжету

$$q = \frac{0{,}5C}{F_1}, \ кГ/см^2 \quad (9\text{-}93)$$

не должно превышать 300 $кГ/см^2$ при угонной скорости. Это условие и определяет высоту h_2.

Нижняя часть пластины, имеющая форму трапеции, получила название ласточкина хвоста. Расчет на смятие манжеты определяет и прочность на изгиб ласточкина хвоста коллекторной пластины.

В длинных коллекторах необходимо проверить напряжение изгиба и прогиб в середине пластины, принимая ее как балку с равномерно распределенной по длине нагрузкой. Этот расчет следует вести для изношенного коллектора, принимая величину износа по табл. 9-6.

$$\sigma = 1{,}75 \frac{l_0^2 p}{\theta (D_2 + h_{изн}) h_{изн}} \zeta, \ кГ/см^2, \quad (9\text{-}94)$$

где l_0 — расстояние между точками A и B, *см*;

p — удельное давление между пластинами, $кГ/см^2$; для коллекторов с наружным диаметром до 400 *мм* $p = 60 \div 80$ $кГ/см^2$, а для бо́льших коллекторов $p = 100 \div 120$ $кГ/см^2$;

θ — коэффициент заполнения коллектора медью;

$$\theta = 1 - \frac{Ks}{\pi (D_1 - h)};$$

D_1 — наружный диаметр коллектора, *см*;

D_2 — внутренний диаметр коллектора, *см*;

$h_{изн} = h_1 - h_0$, *см*;

$$\zeta = 1{,}5 + 0{,}022 \frac{(D_1 - h)^2}{p} \left(\frac{n_{макс}}{1\,000}\right)^2.$$

Коэффициент ζ учитывает влияние нагрева коллектора и скорости вращения на напряжения в его деталях.

Прогиб в середине пластины

$$f = \frac{C}{EJ} \cdot \frac{0{,}5 l_0^3}{384} \cdot 0{,}5 \ см. \quad (9\text{-}95)$$

Прогиб не должен превышать 0,001 *см* во избежание недопусти-

мого искажения цилиндрической формы коллектора. Коэффициент 0,5 учитывает сцепление пластин с миканитовыми прокладками.

в) **Коллекторы быстроходных машин с бандажными кольцами.** С увеличением окружной скорости возрастает центробежная сила коллекторных пластин, а следовательно, и удельное давление на миканитовые манжеты. Кроме того, при увеличении длины коллекторной пластины растет величина прогиба в средней ее части. Это заставляет для длинных коллекторов быстроходных машин отказаться от описанной выше арочной конструкции коллектора и перейти к коллекторам с бандажными кольцами. Коллекторы с бандажными кольцами имеют две конструктивные разновидности: втулочные и мембранные.

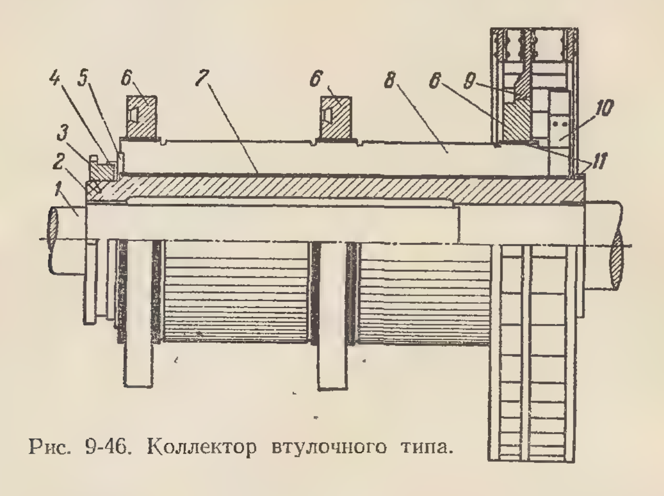


Рис. 9-46. Коллектор втулочного типа.

На рис. 9-46 показана конструкция коллектора втулочного типа с тремя бандажными кольцами. Коллектор состоит из пластин *8* твердотянутой меди клинообразного сечения, собранных в кольцо с промежуточными миканитовыми прокладками. Коллекторные пластины изолированы от втулки *2* миканитовой изоляцией *7*, а от бандажных колец *6* — миканитовыми поясками *11*. На одно из бандажных колец насажен вентилятор *9*. К каждой коллекторной пластине припаян ленточный петушок *10* для соединения с проводниками обмотки якоря. Втулка *2* коллектора насажена на вал машины *1*. Коллекторные пластины удерживаются на конической поверхности изоляции *7* гайкой *3*, навернутой на конец втулки. Гайка изолирована от пластин коллектора шайбой *5* и предохранена от самоотвертывания звездчатой шайбой *4*. В бандажных кольцах проточены канавки трапецеидального сечения для балансировочных грузов. В процессе производства сначала пластины прессуют в технологических прессовочных кольцах, а затем поочередно заменяют бандажными кольцами из высокопрочной легированной стали [Л. 73].

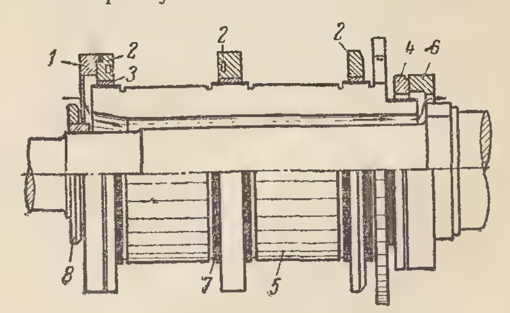


Рис. 9-47. Коллектор мембранного типа.

На рис. 9-47 представлена конструкция коллектора мембранного типа с тремя бандажными кольцами *2* и дополнительным бандажным кольцом *4*, расположенным между петушками коллектора и якорем. В данной конструкции бандажные кольца насажены не на миканитовые пояски *7*, а на тонкие

стяжные кольца *3*, которые предназначены для предварительной прессовки миканитовых поясков.

Комплект коллекторных пластин *5* вместе с бандажными кольцами *2* опирается на мембраны *1* и *6*, которые напрессованы на вал. Для увеличения прочности ступицы мембраны *1* на нее напрессовано бандажное кольцо *8*. В мембранах просверлены отверстия для циркуляции охлаждающего воздуха, путь которого показан стрелками.

Преимущества мембранных коллекторов перед втулочными заключаются в следующем:

экономия стали и миканита ввиду отсутствия втулки; упрощение технологического процесса, так как отпадает необходимость обработки втулки и ее миканитовой изоляции; хорошее внутреннее охлаждение пластин.

Коллекторы с бандажными кольцами имеют меньшую радиальную высоту, но зато бо́льшую длину, чем пластины коллекторов арочного типа. Наличие бандажных колец ведет к усложнению конструкции щеточного аппарата и ухудшению охлаждения поверхности коллектора.

Коллекторы с бандажными кольцами применяются главным образом в возбудителях турбогенераторов, но иногда к ним прибегают и при конструировании других быстроходных машин.

Для быстрого выбора типа коллектора при проектировании пользуются графиком (рис. 9-48). По оси абсцисс отложены отношения длины коллекторной пластины к диаметру коллектора, а по оси ординат — максимальные окружные скорости коллектора по наружному диаметру. Слева от кривой лежит область арочных коллекторов, а справа — область коллекторов с бандажными кольцами. Так, например, при окружной скорости 40 *м/сек* арочный коллектор может быть построен при отношении длины к диаметру, не превышающем 0,9. Для коллекторов с бандажными кольцами берется длина пластины за вычетом ширины бандажных колец.

Расчет. Полный расчет коллекторов с бандажными кольцами представляет собой сложную задачу, так как приходится учитывать деформации пластин и усадку миканитовой изоляции. Между тем механические свойства изоляции могут изменяться в широких пределах. Поэтому

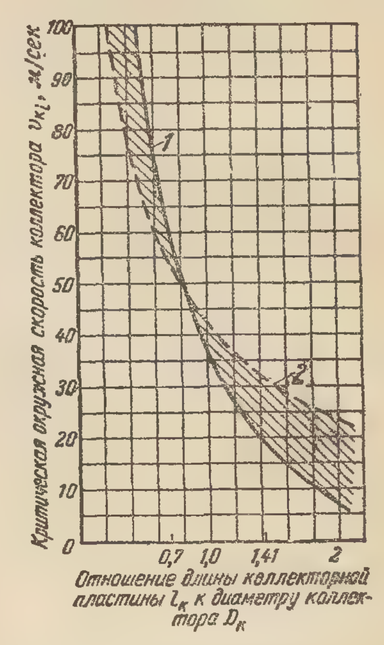


Рис. 9-48. График для выбора типа коллектора.

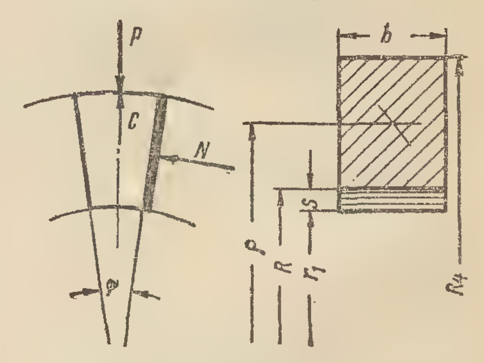


Рис. 9-49. К расчету коллектора с бандажными кольцами.

здесь приводится упрощенный метод расчета [Л. 70], основанный на предположении, что коллекторные пластины являются абсолютно жесткими, а конструкция коллектора симметрична. При этом все силы, приложенные к пластине, лежат в одной плоскости.

Расчет заключается в определении давления бандажных колец на

медные пластины, нормальных сил арочного распора, центробежных сил, натяга между миканитовыми поясками и бандажными кольцами и напряжений в кольцах на растяжение. На рис. 9-49 показаны расчетные величины и их буквенные обозначения.

Необходимое удельное давление между пластинами при вращении коллектора с максимальной скоростью [Л. 8].

$$p = 60 + 5 \times \left(\frac{n_{\text{макс}}}{1\,000} \cdot \frac{2R_1}{10}\right)^{3/2}, \text{ кГ/см}^2. \quad (9\text{-}96)$$

Нормальная сила бокового давления

$$N = hlp, \text{ кГ}, \quad (9\text{-}97)$$

где l — длина пластины, *см*.

Средний удельный вес коллекторных пластин с учетом миканитовых прокладок между ними

$$\gamma' = 8{,}9 - \frac{2Ksh}{\pi\left(R_1^2 - R_2^2\right)}, \text{ кГ/дм}^3. \quad (9\text{-}98)$$

Максимальная окружная скорость на наружной окружности

$$v = \frac{2\pi R_1 n_{\text{макс}}}{60}, \text{ м/сек}. \quad (9\text{-}99)$$

Центробежная сила всех коллекторных пластин

$$C = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{\gamma' v^2}{98} R_1 l \times \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^3\right], \text{ кГ}. \quad (9\text{-}100)$$

Центробежная сила одной пластины с изоляцией

$$c = \frac{C}{K}, \text{ кГ}. \quad (9\text{-}101)$$

Средний радиус коллектора

$$R_3 = \frac{R_1 + R_2}{2}. \quad (9\text{-}102)$$

Средняя толщина коллекторной пластины

$$t = \frac{2\pi R_3}{K} - s, \text{ см}. \quad (9\text{-}103)$$

Центральный угол коллекторной пластины

$$\varphi = \frac{t}{R_3}, \text{ рад}. \quad (9\text{-}104)$$

Давление всех бандажных колец на пластину

$$P = c + N\varphi, \text{ кГ}. \quad (9\text{-}105)$$

Давление одного бандажного кольца

$$P' = \frac{P}{z}, \text{ кГ}, \quad (9\text{-}106)$$

где z — число колец.

Средний радиус бандажного кольца

$$R_6 = \frac{R_4 + R_5}{2}, \text{ см}. \quad (9\text{-}107)$$

Сечение бандажного кольца

$$F = (R_4 - R_5)\,b, \text{ см}^2. \quad (9\text{-}108)$$

Окружная скорость бандажного кольца по среднему радиусу

$$v_1 = \frac{2\pi R_6 n_{\text{макс}}}{60}, \text{ м/сек}. \quad (9\text{-}109)$$

Удельный вес стали бандажного кольца $\gamma_{Fe} = 7{,}85$ *кГ/дм*³.

Модуль упругости стали $E_{Fe} = 2{,}15 \cdot 10^6$ *кГ/см*².

Модуль упругости меди $E_{Cu} = 1{,}2 \cdot 10^6$ *кГ/см*².

Модуль упругости миканита

$$E_{\text{м}} = 2 \cdot 10^4 \text{ кГ/см}^2.$$

Абсолютный натяг между бандажным кольцом и миканитовым пояском

$$\Delta R_1 = \frac{\delta}{8{,}5} + \frac{\gamma_{Fe} v_1^2 R_6}{g E_{Fe}} + \frac{R_6 K P}{2\pi z F E_{Fe}} + (P - c)\frac{K R_3}{2\pi b h l E_{\text{м}}} \times \left(s + t\frac{E_{\text{м}}}{E_{Cu}}\right), \text{ см}. \quad (9\text{-}110)$$

Относительный натяг

$$\frac{\Delta R_1}{R_1}. \quad (9\text{-}111)$$

При неподвижном коллекторе второй член правой части формулы (9-110) и c превращаются в нуль, а сила P увеличивается до значения P_0. Силу P_0 можно определить, не производя громоздких вычислений,

если в правой части формулы (9-110) третий и четвертый члены умножить на отношение

P_0/P (см. пример расчета). (9-112)

Давление между коллекторными пластинами при неподвижном коллекторе определяется по формуле

$$p_0 = \frac{P_0 R_3}{thl}, \ кГ/см^2. \qquad (9\text{-}113)$$

Напряжение на растяжение в бандажном кольце при вращении коллектора определяется по формуле

$$\sigma = \frac{\gamma_{Fe} v_1^2}{g} + \frac{KP}{2\pi Fz}, \ кГ/см^2, \qquad (9\text{-}114)$$

а при неподвижном коллекторе — по формуле

$$\sigma_0 = \frac{KP_0}{2\pi FZ}, \ кГ/см^2. \qquad (9\text{-}115)$$

Допускаемое напряжение может быть доведено до 0,7 предела текучести материала кольца $\sigma_s = 4\,500$ $кГ/см^2$, т. е.

$$\sigma_{доп} = 0{,}7 \cdot 4\,500 = 3\,150 \ кГ/см^2. \qquad (9\text{-}116)$$

Пример расчета симметричного коллектора с тремя бандажными кольцами при $K=120$, $n_{макс}=3\,600$ *об/мин*, с наружным диаметром 30 *см*, внутренним диаметром 20 *см*, толщиной изоляции между пластинами $s=0{,}08$ *см*, толщиной изоляционного пояска $\delta=0{,}25$ *см*, длиной пластины $l=50$ *см*, наружным диаметром бандажного кольца 42,5 *см* и внутренним его диаметром 30,5 *см*, шириной $b=3$ *см*.

$$p = 60 + 5\,(3{,}6\cdot 3)^{1{,}5} = 238 \ кГ/см^2.$$

$$\gamma' = 8{,}9 - \frac{2\cdot 120\cdot 0{,}08\cdot 5}{\pi\,(15^2 - 10^2)} = 8{,}65 \ кГ/дм^3.$$

$$v = \frac{2\pi\cdot 15\cdot 3\,600}{60} = 56{,}5 \ м/сек.$$

$$C = \frac{2\pi\cdot 8{,}65\cdot 56{,}5^2}{3\cdot 98}\cdot 15\cdot 50 \times \left[1 - \left(\frac{10}{15}\right)^2\right] = 310\,000 \ кГ.$$

$$c = \frac{310\,000}{120} = 2\,600 \ кГ.$$

$$R_3 = \frac{15 + 10}{2} = 12{,}5 \ см.$$

$$t = \frac{2\cdot\pi\cdot 12{,}5}{120} - 0{,}08 = 0{,}575 \ см.$$

$$\varphi = \frac{0{,}575}{12{,}5} = 0{,}046 \ рад.$$

$$N = 5\cdot 50\cdot 238 = 59\,500 \ кГ$$

$$P = 2\,600 + 59\,500\cdot 0{,}046 = 5\,320 \ кГ.$$

$$P' = \frac{5\,320}{3} = 1\,780 \ кГ.$$

$$R_б = \frac{21{,}25 + 15{,}25}{2} = 18{,}25 \ см.$$

$$F = (21{,}25 - 15{,}25)\cdot 3 = 18 \ см^2.$$

$$v_1 = \frac{2\cdot\pi\cdot 18{,}25\cdot 3\,600}{60} = 68{,}5 \ м/сек.$$

$$\Delta R_1 = \frac{0{,}25}{8{,}5} + \frac{7{,}85\cdot 68{,}5^2\cdot 18{,}25}{98\cdot 2{,}15\cdot 10^6} + \frac{18{,}25\cdot 120\cdot 5\,320}{2\pi\cdot 3\cdot 18\cdot 2{,}15\cdot 10^6} + (5\,320 - 2\,600) \times \frac{120\cdot 12{,}5}{2\cdot\pi\cdot 0{,}575\cdot 5\cdot 50\cdot 2\cdot 10^4}\left(0{,}08 + 0{,}575\cdot\frac{2\cdot 10^4}{12\cdot 10^6}\right) = 0{,}0294 + 0{,}0032 + 0{,}0159 + 0{,}0200 = 0{,}0685 \ см.$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{0{,}0685}{15} = 0{,}0046 = 0{,}46\%.$$

При неподвижном коллекторе

$$0{,}0685 = 0{,}0294 + 0{,}0159\,\frac{P_0}{5\,320} + 0{,}75 P_0\cdot 10^{-5};$$

$$0{,}0391 = P_0\cdot 1{,}05\cdot 10^{-5};$$

$$P_0 = 3770 \ кГ.$$

$$p_0 = \frac{3770\cdot 12{,}5}{0{,}575\cdot 5\cdot 50} = 330 \ кГ/см^2.$$

Напряжения на растяжение в бандажном кольце:

$$\sigma = \frac{7{,}85\cdot 68{,}5^2}{98} + \frac{120\cdot 5\,320}{2\pi\cdot 18\cdot 3} = 400 + 1\,880 = 2\,280 \ кГ/см^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{120\cdot 3\,770}{2\pi\cdot 18\cdot 3} = 1\,340 \ кГ/см^2.$$

г) **Коллекторы на пластмассе.** Коллекторы на пластмассе более устойчивы в эксплуатации в отношении сохранения правильной цилиндрической формы, чем коллекторы со стальными корпусами. Трудоемкость и стоимость их также ниже, чем коллекторов с миканитовыми манжетами. Пластмасса впрессовывается во внутреннее отверстие коллектора, поэтому отпадают требования точности и чистоты поверхности выточек в пластинах и обработка пластин на станках может быть заменена штамповкой.

Коллекторы на пластмассе можно разделить на две основные разновидности: коллекторы из полосовой меди трапецеидального сечения и коллекторы со штампованными или прессованными заготовками пластин. Первые охватывают широкий диапазон диаметров от 20 до 500 *мм;* вторые применяются только в микромашинах при диаметре коллектора до 30 *мм.* В свою очередь коллекторы из полосовой меди имеют несколько разновидностей конструкции.

В микромашинах с диаметром коллектора до 30 *мм* в пластмассовом корпусе формуют отверстие, которым коллектор насаживают на поверхность вала, имеющую сетчатое рифление. Кольцо коллектора составлено из пластин с миканитовыми прокладками между ними. В этих коллекторах всю нагрузку от центробежной силы пластин выдерживает пластмассовый корпус.

В коллекторах большего диаметра для разгрузки пластмассового корпуса в углубления коллекторных пластин вкладывают армировочные кольца *3* (см. рис. 9-1). Кольца состоят из двух витков проволоки или стальной полосы, сваренных встык. Для того чтобы стальные кольца не создавали замыканий между пластинами коллектора, миканитовые прокладки и медные пластины штампуют разными штампами, и выступы миканита не позволяют кольцам прикоснуться к пластинам. Внутрь коллектора запрессована стальная втулка, которая обеспечивает надежную посадку коллектора на вал. Для лучшего сцепления с пластмассой во втулке проточены кольцевые канавки. Такие коллекторы выполняют диаметром до 210 *мм.*

Для коллекторов на пластмассе широко используется асборезольная масса марки К-6. Она изготовляется на основе фенольно-формальдегидных смол резольного типа с минеральным волокнистым наполнителем — асбестом. Эта пластмасса имеет достаточную механическую прочность и нагревостойкость, допуская температуры до 200° С. К недостаткам ее можно отнести сравнительно невысокую электрическую прочность из-за наличия в асбестовом волокне железистых включений. В последнее время начат выпуск новой прессовочной массы АГ-4 марок В и С на основе модифицированной фенольно-формальдегидной смолы с наполнителем из стекловолокна. Эта масса обладает высокими механическими и диэлектрическими свойствами. В машинах высокого напряжения, где применение стальных армировочных колец и пластмассы К-6



Рис. 9-50. Коллектор с прессованными пластинами.

недопустимо, корпус коллектора делают из пластмассы АГ-4В, а армировочные кольца — из пластмассы АГ-4С.

В коллекторах на пластмассе с пластинами из полосовой меди трапецеидального сечения еще сохраняются основные недостатки коллекторов со стальными корпусами, заключающиеся в больших отходах меди и наличии прокладок из дорогого коллекторного миканита. Для коллекторов диаметром до 30 *мм* удалось решить эти вопросы путем замены полосовой меди цилиндрическими заготовками комплекта пластин. Для этого методом ударного прессования получают цилиндр с внутренними зубцами, число которых равно числу пластин коллектора (рис. 9-50, *а*). Для лучшего сцепления с пластмассовой зубцы выгибают специальным штампом (рис. 9-50, *б*). После этого заготовку вставляют в прессформу и запрессовывают пластмассой. Разделение пластин производят или фрезерованием, или обточкой коллектора. В последнее время заготовку коллекторных пластин стали выполнять металлокерамическим способом из медного порошка.

Расчет коллекторов на пластмассе. Расчет коллекторов на пластмассе сводится к определению нагрузки и напряжения в кольце из пластмассы, удерживающем пластины. Нагрузка этого кольца складывается из центробежной силы коллекторных пластин и усилия арочного распора. Удельная нагрузка

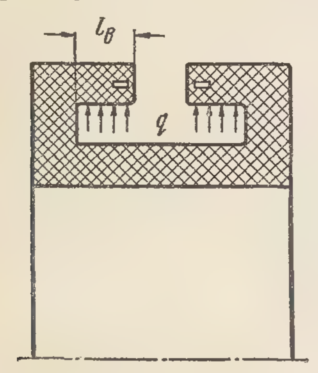


Рис. 9-51. К расчету коллектора на пластмассе.

пластмассового кольца, приходящаяся на 1 $см^2$ его поверхности (рис. 9-51), определяется по формуле

$$q=\left[\frac{t_и\gamma_и}{2f}\cdot\frac{m^2}{R}+\frac{1}{1-\theta}(F_{пл}\gamma_{пл}+\right.$$

$$+F\gamma_м\theta)\frac{E_и}{F_{пр}E_{пл}}(m^2-1)+$$

$$\left.+\gamma_м\theta\right]\frac{FR}{2gl_b}\omega^2_{макс}, \qquad (9\text{-}117)$$

где индексами «пл» обозначены величины, относящиеся к материалу пластмассы, «м» — к меди, «ст» — к стали и «и» — к изоляции между пластинами;

t — толщина, *см*;

γ — удельный вес, *кГ/см³*;

f — коэффициент трения между медными пластинами и миканитовыми прокладками;

m — отношение испытательной скорости к максимальной эксплуатационной:

$$m=\frac{n_{исп}}{n_{макс}}; \qquad (9\text{-}118)$$

R — радиус инерции коллектора, *см*;

θ — коэффициент заполнения коллектора медью:

$$\theta=\frac{t_м}{t_м+t_и}; \qquad (9\text{-}119)$$

$F_{пл}$ — сечение пластмассового кольца, *см²*;

E — модуль упругости, *кГ/см²*;

$F_{пр}$ — приведенное сечение пластмассового кольца с учетом наличия армировочных витков стальной проволоки:

$$F_{пр}=F_{пл}+\frac{E_{ст}}{E_{пл}}F_{ст}; \qquad (9\text{-}120)$$

F — боковая поверхность коллекторной пластины, *см²*;

g — ускорение силы тяжести равное 981 *см/сек²*; (9-121)

l_b — ширина пластмассового кольца, *см*;

ω — угловая скорость, *1/сек*:

$$\omega=\frac{\pi n}{30}. \qquad (9\text{-}122)$$

Напряжение на растяжение пластмассового кольца

$$\sigma=\frac{2q\,l_b}{F_{пр}}R, \quad кГ/см^2. \qquad (9\text{-}123)$$

Пример расчета. Расчет проведем для коллектора с армировочными кольцами.

Расчетные данные: $E_{ст}=2{,}1\cdot10^6$ *кГ/см²*; $E_и=0{,}01\cdot10^6$ *кГ/см²*; $E_м=1{,}2\cdot10^6$ *кГ/см²*; $E_{пл}=0{,}15\cdot10^6$ *кГ/см²*; $\gamma_м=0{,}0089$ *кГ/см³*; $\gamma_и=0{,}0020$ *кГ/см³*; $\gamma_{пл}=0{,}0018$ *кГ/см³*; $f=0{,}05$.

Размеры коллектора: $D_к=210$ *мм*; $R=86$ *мм*; $F=26{,}6$ *см²*; $F_{пл}=24$ *см²*; $F_{ст}=0{,}1$ *см²*; $t_м=2{,}32$ *мм*; $t_и=0{,}8$ *мм*; $l_b=20$ *мм*; $n_{испыт}=5\,000$ *об/мин*; $n_{макс}=3\,000$ *об/мин*.

Предварительно вычисляем:

$$\theta=\frac{2{,}32}{2{,}32+0{,}8}=0{,}744.$$

$$F_{пр}=24+2\cdot\frac{2{,}1\cdot10^6}{0{,}15\cdot10^6}\cdot0{,}1=27\ см^2.$$

$$\omega=\frac{\pi\cdot3\,000}{30}=314\ 1/сек.$$

$$m=\frac{5\,000}{3\,000}=1{,}66.$$

$$q=\left[\frac{0{,}08\cdot0{,}002}{2\cdot0{,}05}\cdot\frac{1{,}66^2}{8{,}6}+\right.$$

$$+\frac{1}{1-0{,}744}(24\cdot0{,}0018+$$

$$+26{,}6\cdot0{,}744\cdot0{,}0089)\frac{0{,}01\cdot10^6}{27\cdot0{,}15\cdot10^6}(1{,}66^2-$$

$$-1)+0{,}744\cdot 0{,}0089\Big]\frac{26{,}6\cdot 8{,}6}{2{,}981\cdot 2}\cdot 314^2 =$$

$$= 56 \ кГ/см^2.$$

$$\sigma = \frac{2\cdot 56\cdot 2\cdot 8{,}6}{27} = 71{,}5 \ кГ/см^2.$$

Для пластмассы марки К-6 минимальный предел прочности при растяжении составляет 200 $кГ/см^2$.

По данным испытаний на армировочное кольцо приходится примерно 20% нагрузки.

9-10. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Контактные кольца применяются в синхронных машинах, крупных асинхронных двигателях и преобразователях. Что касается асинхронных двигателей мощностью до 100 *квт*, то основным исполнением являются двигатели с короткозамкнутым ротором. С контактными кольцами выполняются лишь небольшое число двигателей общего применения, а также асинхронные двигатели специализированного назначения с регулировкой скорости (крановые двигатели и т. п.).

По конструкции контактные кольца бывают: а) с болтовым креплением; б) с холодной прессовкой на втулку; в) с горячей прессовкой на втулку; г) на пластмассе.

Кольца с болтовым креплением применяются в крупных машинах. Основанием служит чугунная втулка с лучами, через которые проходят шпильки, скрепляющие кольца со втулкой. Контактные кольца изолированы от втулки и шпилек изоляционными трубочками и шайбами из миканита или текстолита. В асинхронных двигателях с тремя контактными кольцами втулка состоит из двух частей (рис. 9-52), надетых одна на другую, для того чтобы при сборке можно было установить среднее кольцо. В промежутках между лучами втулки пропускают три контактные шпильки для подвода тока к кольцам. Преимущества контактных колец с болтовым креплением заключаются в хорошем охлаждении колец, которые почти по всей поверхности омываются воздухом, и малом весе конструкционных и изоляционных материалов. Но контактные кольца с болтовым креплением менее надежны в отношении прочности крепления и биения. По мере усадки изоляционных материалов крепление колец может ослабевать. Поэтому избегают применять их в машинах с тяжелыми условиями работы (частыми пусками, резкими торможениями и реверсированием).

Последние достижения в области изоляционных материалов дали воз-

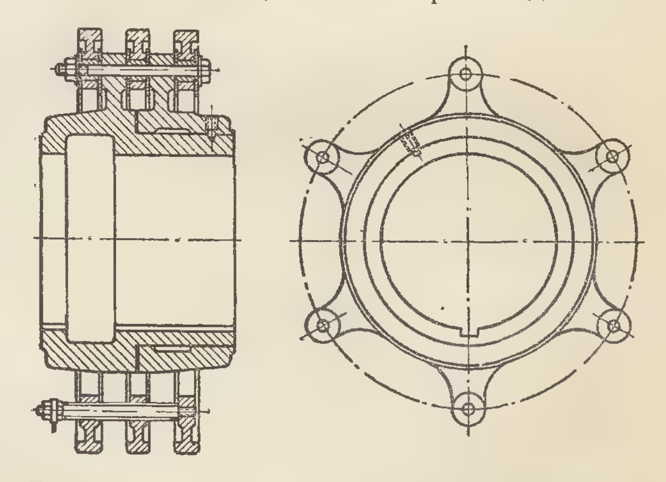


Рис. 9-52. Контактные кольца с болтовым креплением.

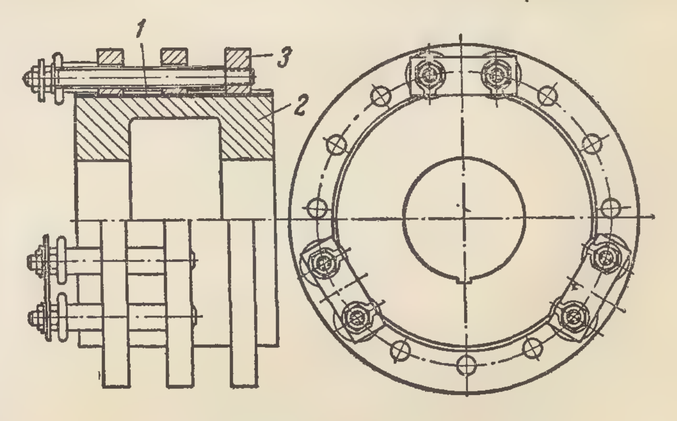


Рис. 9-53. Контактные кольца на миканите.

можность разработать конструкцию колец без втулки, которые скрепляются лишь стяжными шпильками и прикрепляются к торцу вала (см. рис. 9-15).

В асинхронных двигателях малой мощности (до 100 *квт*) применяют холодную прессовку колец на втулку (рис. 9-10). В качестве изоляционного материала применяют полоски электрокартона с проложенными между ними слоями лакоткани для повышения влагостойкости. Полоски электрокартона требуемой толщины вкладывают внутрь колец так, чтобы стыки их распределялись равномерно по окружности. Внутрь контактных колец вставляют гильзу, свернутую из листовой стали, которая предохраняет слои изоляции от смятия при прессовке. Втулку контактных колец с конической заточкой на конце вставляют в отверстие гильзы и запрессовывают давлением гидравлического пресса. Натяг прессовки контролируют по манометру.

Контактные кольца с горячей прессовкой на втулку являются наиболее надежными в эксплуатации и поэтому находят применение в крупных машинах и при тяжелых условиях работы. Для изоляции колец *3* (рис. 9-53) от втулки *2* применяют листы формовочного миканита *1* толщиной 0,5—0,7 *мм*. Перед посадкой колец производят покрытие втулки миканитом (наложение необходимого числа слоев миканита, прессовка и запечка изоляции). Для насадки колец изолированную втулку устанавливают на ровной плите, нагревают кольца до 350—450° С и надевают их на втулку.

Как известно, в асинхронных двигателях кольца служат только для пуска двигателя. Поэтому в двигателях большой мощности применяли приспособления для замыкания колец накоротко и подъема щеток с целью предотвратить их бесполезное изнашивание и уменьшить потери. Однако при частых пусках подъем и опускание щеток при каждом пуске с одновременным замыканием колец практически выполнить невозможно. Кроме того, необходимость замыкания колец исключает возможность автоматического и дистанционного управления электродвигателями, что в некоторых установках (прокатные станы, грузоподъемные краны) является необходимым условием. Эти соображения привели к тому, что в новых единых сериях асинхронных электродвигателей приспособления для замыкания колец и подъема щеток не предусмотрены конструкцией. Для снижения потерь на кольцах они выполняются из цветного металла. Отказ от приспособлений для короткого замыкания колец и подъема щеток сказался на увеличении надежности работы двигателей, так как эти приспособления часто повреждались, что являлось причиной выхода двигателей из строя.

Материалом для контактных колец двигателей малой и средней мощности могут служить черные металлы — сталь или чугун. При постоянно налегающих щетках опасность коррозии колец отсутствует, так как щетки счищают слой окиси.

В крупных машинах кольца отливаются из бронзы. В целях экономии цветных металлов целесообразно делать чугунные кольца с медным ободком, толщина которого выбирается с учетом срабатывания колец в эксплуатации.

Отверстия для контактных шпилек заставляют увеличивать радиальную высоту кольца. Кроме того, резьба является ненадежным контактом. Поэтому целесообразно заменять шпильки медными шинами, которые проходят через канавки, продолбленные в кольцах, и привариваются к одному из колец (см. рис. 9-10).

Контактные кольца должны быть рассчитаны на действие центробежной силы после их предельного износа. Запас на срабатывание берут для колец диаметром до 100 *мм* 3—4 *мм*, от 100 до 250 *мм* 5—6 *мм* и свыше 250 *мм* 7—8 *мм* на сторону. Опасным сечением кольца является сечение, ослабленное отверстием для контактной шпильки.

Центробежная сила кольца

$$C = 11{,}2GR\left(\frac{n_{\text{макс}}}{1\,000}\right)^2, \ кГ, \quad (9\text{-}124)$$

где G — вес кольца, $кГ$;

R — средний радиус кольца, $см$;

$n_{макс}$ — угонная скорость вращения, $об/мин$.

Напряжение в опасном сечении кольца

$$\sigma = \frac{C}{2\pi S}, \; кГ/см^2, \qquad (9\text{-}125)$$

где S — площадь сечения кольца:

$$S = \left(\frac{D_{изн} - D_2}{2} - d_0\right) b, \; см^2.$$

Здесь: $D_{изн}$ — диаметр кольца после износа, $см$;

D_2 — внутренний диаметр кольца, $см$;

D_0 — диаметр отверстия для болта, $см$;

b — ширина кольца, $см$.

Контактные кольца, напрессованные на втулку, должны быть рассчитаны с учетом напряжения, возникающего при прессовой посадке кольца на втулку, по формуле (9-22). Здесь принимается худший случай, когда изоляция не имеет усадки.

Пример расчета. Расчет контактных колец, показанных на рис. 9-53.

Расчетные данные: $n_{ном}=750$ $об/мин$; $n_{макс}=1\,000$ $об/мин$; $D_1=540$ $мм$; $D_{изн}=524$ $мм$; $D_2=400$ $мм$; $d_0=32$ $мм$; $b=38$ $мм$.

Вес изношенного кольца

$$G = 3{,}14 \cdot 46{,}2 \cdot 6{,}2 \cdot 3{,}8 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 30 \; кГ,$$

где средний диаметр кольца

$$\frac{524 + 400}{2} = 462 \; мм;$$

высота изношенного кольца

$$\frac{524 - 400}{2} = 62 \; мм.$$

Центробежная сила кольца

$$C = 11{,}2 \cdot 30 \cdot 23{,}1 \left(\frac{1\,000}{1\,000}\right)^2 = 7\,800 \; кГ.$$

Напряжение на растяжение в кольце

$$\sigma = \frac{7\,800}{2 \cdot 3{,}14\,(6{,}2 - 3{,}2) \cdot 3{,}8} = 110 \; кГ/см^2.$$

Проверим напряжение от натяга прессовой посадки (Пр). По ОСТ 1043 допуски на отверстие $+^{0}_{60}$ $мк$, на вал $^{+260}_{+260}$ $мк$.

Максимальный натяг 260 $мк$. Относительный натяг

$$\delta = \frac{0{,}26}{400} = 6{,}5 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha = \frac{524}{400} = 1{,}3.$$

Напряжение в кольце по (9-22)

$$\sigma = 105 \cdot 10^4 \left(1 + \frac{1}{1{,}3^2}\right) \cdot 6{,}5 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 1\,100 \; кГ/см^2.$$

9-11. ПОДШИПНИКИ И ПОДПЯТНИКИ

а) Подшипники качения. Электрические машины мощностью примерно до 1 000 *квт* выполняются на подшипниках качения. Это не только все машины с подшипниковыми щитами, но и часть машин на стояковых подшипниках, например машина постоянного тока П 104 (см. рис. 9-3).

Преимущества подшипников качения заключаются в следующем:

а) меньшие размеры и более компактная конструкция узлов;

б) незначительный износ, обеспечивающий постоянство воздушного зазора;

в) простота обслуживания и экономия смазочных материалов;

г) меньшие потери на трение, почти одинаковые для пуска и при установившейся скорости вращения, что особенно важно для машин с частыми пусками.

Отверстия внутренних колец подшипников качения изготовляются по системе отверстия, а наружные диаметры внешних колец — по системе вала. Для подшипниковых узлов, в которых вращается вал, что имеет место в подавляющем большинстве электрических машин, внутреннее кольцо насаживается на вал плотно и при очередных разборках с вала не снимается, а наружное кольцо шарикоподшипников вставляется в подшипниковый щит подвижно.

В электрических машинах условия работы подшипников усложняются нагревом их вследствие потерь в активных частях машины; разъеданием подшипников электрическим током; возникновением одностороннего магнитного притяжения при смещении центра ротора из геометрического центра машины; малым зазором между статором и ротором в асинхронных двигателях; необходимостью защиты внутреннего про-

странства машины от смазочных масел. В электрических машинах с нагревостойкой изоляцией возникает опасность разжижения и вытекания консистентной смазки вследствие высокой температуры нагрева подшипниковых узлов.

В электрических машинах с горизонтальным валом при отсутствии

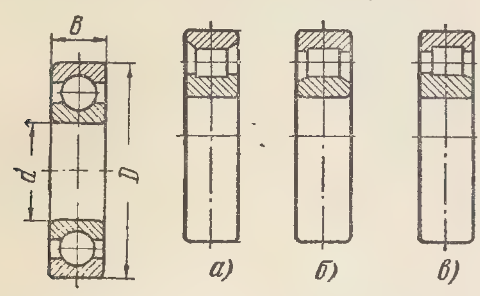


Рис. 9-54. Радиальный шарикоподшипник.

Рис. 9-55. Радиальные роликоподшипники.

больших осевых нагрузок применяют радиальные однорядные шарикоподшипники или радиальные роликоподшипники с короткими цилиндрическими роликами.

Радиальные шарикоподшипники (рис. 9-54) могут воспринимать наравне с радиальной нагрузкой и небольшие осевые нагрузки в обе стороны, что позволяет использовать их для фиксации ротора в осевом направлении. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник может воспринимать большие осевые нагрузки; такие подшипники используют в вертикальных машинах.

Радиальные шарикоподшипники имеют наименьшие потери на трение и наибольшие допустимые скорости вращения по сравнению с подшипниками качения других типов с такими же наружными размерами. Допустимые по каталогу скорости вращения могут быть повышены при смазке подшипников жидким маслом. Такие шарикоподшипники не допускают перекоса внутреннего кольца по отношению к наружному более чем на 15′. При бо́льших перекосах возможны аварии из-за перегрева подшипника и разрыва сепаратора.

Размеры и эксплуатационные данные радиальных шарикоподшипников легкой, средней и тяжелой серий приведены в табл. XII-1.

Радиальные роликоподшипники с короткими цилиндрическими роликами имеют несколько конструктивных разновидностей.

Подшипник типа 2000 (рис. 9-55, *а*) имеет наружное кольцо без бортов и внутреннее кольцо с двумя бортами. При разборке ролики с сепаратором остаются на внутреннем кольце. Подшипник воспринимает только радиальную нагрузку; для смазки рекомендуется жидкое масло.

Подшипник типа 32000 (рис. 9-55, *б*) имеет внутреннее кольцо без бортов и наружное кольцо с двумя бортами. При разборке ролики вместе с сепаратором остаются в наружном кольце. Подшипник воспринимает только радиальную нагрузку; для смазки могут быть применены как жидкое масло, так и консистентная смазка. Так как роликоподшипники типов 2000 и 32000 не могут воспринимать осевую нагрузку, их используют в комбинации с шарикоподшипником, который фиксирует положение ротора (см. рис. 9-2 и 9-8).

Подшипник типа 42000 (рис. 9-55, *в*) имеет наружное кольцо с двумя бортами и внутреннее кольцо с одним бортом. При разборке ролики с сепаратором остаются в наружном кольце. Подшипник воспринимает радиальную нагрузку и небольшую осевую нагрузку в одном направлении. В машинах с двумя роликоподшипниками делают сдвиг между наружным и внутренним кольцами для создания осевого зазора.

Роликоподшипники обладают большей радиальной грузоподъемностью, чем шарикоподшипники тех же размеров. Благодаря разборной конструкции они более удобны для монтажа и обслуживания. Они очень чувствительны к перекосу колец, поэтому их можно применять лишь в машинах с короткими толстыми валами.

Продолжительность работы подшипников качения во многом зави-

сит от наличия смазки. Смазка в подшипниках качения имеет следующее назначение: она уменьшает трение между роликами или шариками и сепаратором, а также между бортами колец и торцами роликов; предохраняет подшипники от коррозии; защищает их от попадания в них грязи из окружающей

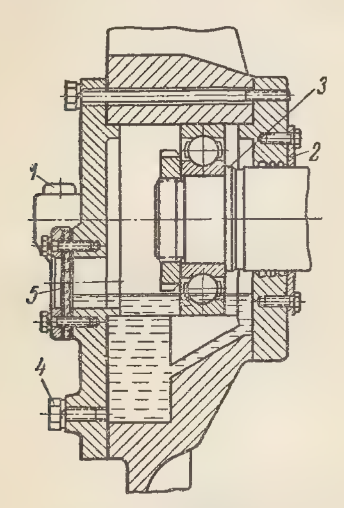


Рис. 9-56. Подшипниковый узел с жидкой смазкой.

среды; равномерно распределяет и отводит тепло от подшипника; смягчает удары шариков или роликов о кольца и снижает шумы.

Для смазки подшипников применяют жидкие минеральные масла или консистентные мазеобразные смазки.

Минеральные масла имеют следующие преимущества перед консистентными смазками: они обладают большей стабильностью и меньшим коэффициентом трения, способны проникать в узкие зазоры к трущимся поверхностям, могут быть заменены без разборки узла, лучше отводят тепло от подшипника, вымывают из подшипника продукты его износа.

Подшипниковые узлы на жидкой смазке требуют сложных уплотнительных устройств и наблюдения за работой смазочной системы. Смазочные масла применяют при высоких скоростях вращения, когда $dn>300\,000$ (где d — диаметр вала, *мм*; n—скорость вращения, *об/мин*).

На рис. 9-56 показан подшипниковый узел электрической машины с жидкой смазкой подшипника. Уровень масла в масляной камере доходит почти до центра нижнего шарика. Для сбрасывания масла, растекающегося вдоль вала, служат кольцеобразные выступы *3* на валу. Уплотнительное кольцо *2* предохраняет машину от попадания масла внутрь нее. Фланец со стеклом *5* предназначен для наблюдения за уровнем масла. Спускают масло через отверстие, завинченное пробкой *4* с уплотнительной шайбой; доливают масло через отверстие, закрытое пробкой *1*.

Консистентные смазки представляют собой мазеобразные смазочные материалы, получаемые загущением смазочных масел. Загуститель создает каркас, в клетках которого находится смазочное масло. Консистентные смазки обладают хорошими пластическими свойствами, препятствующими выбрасыванию смазки из подшипника под действием центробежных сил. Свойства консистентных смазок определяются в основном составом загустителя. Наиболее широкое применение имеют мыльные смазки, в которых загустителем служат мыла — соли жирных кислот (в жировых смазках) или синтетических жирных кислот (в синтетических смазках), а в качестве связующего вещества — минеральные масла различной вязкости. Наиболее широко используют смазки, изготовленные на кальциевых, натриевых и натриево-кальциевых мылах. В последнее время начали применять литиевые мыла.

Кальциевые смазки (солидолы) сохраняют свою консистенцию при работе подшипника, негигроскопичны и в воде не растворяются. Их можно применять при температуре подшипника не выше 60° С. При температуре 80° С они расплавляются и после остывания не возвращаются в первоначальное состояние.

Натриевые смазки (консталины) можно использовать при температуре не выше 125° С. При расплавлении и последующем охлаждении они восстанавливают свои пластические

свойства. Но эти смазки гигроскопичны, при смешении с водой образуют эмульсии и могут быть вымыты из подшипника, что выведет его из строя. Поэтому применять их можно только в сухой среде.

Натриево-кальциевые смазки (смазка 1-13) обладают хорошими свойствами. Их применяют для подшипников качения, работающих при температурах до 80° С.

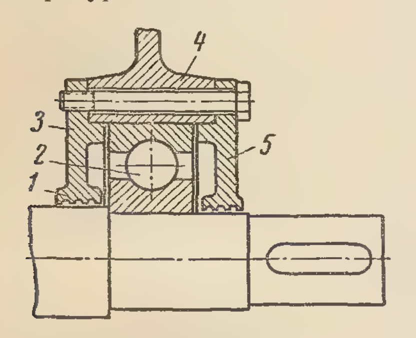


Рис. 9-57. Подшипниковый узел с консистентной смазкой.

Применение изоляционных материалов с высокой нагревостойкостью повлекло за собой повышенный нагрев электрических машин, в том числе подшипников. Для таких машин были разработаны тугоплавкие смазки с температурой разжижения 150—200° С. К ним относятся литиевые смазки ЦИАТИМ 201 и ЦИАТИМ 202, а также кальциевые смазки на кремнийорганической жидкости ЦИАТИМ 221 и ЦИАТИМ 221с.

На рис. 9-57 изображена конструкция подшипникового узла с консистентной смазкой. При диаметрах внутреннего кольца подшипника *2* от 40 до 100 *мм* применяют на валу посадки *П* или *Н* 2-го класса точности по системе отверстия, а в подшипниковом щите посадки *П* или *С* 2-го класса точности по системе вала. Таким образом, при разборке машины шарикоподшипник остается на валу.

Чтобы можно было снять подшипниковый щит *4*, в нем сделана сквозная расточка, которая закрыта со стороны машины крышкой *5*, а снаружи крышкой *3*. Между крышками и валом остается зазор 0,2 *мм*. В крышках проточены канавки *1*. Их заполняют при сборке машины консистентной смазкой, которая защищает подшипник от попадания в него пыли и грязи и препятствует вытеканию смазки из его камеры.

В первых сериях электрических машин применялись подшипниковые узлы с двумя радиальными шарикоподшипниками (рис. 9-58), из которых один (*3*) был зажат крышками *1* в подшипниковом щите *2*, а другой (*4*) мог перемещаться в осевом направлении за счет зазоров. Эти зазоры не допускали заклинивания подшипников при расширении вала от нагрева, а также компенсировали неточности осевых размеров при сборке. При такой конструкции осевого разбега ротора не было. При переходе к массовому производству двигателей малой мощности в целях унификации деталей была принята конструкция, симметричная с обеих сторон двигателя (см. рис. 9-57). При этом оба шарикоподшипника получили свободу осевых перемещений и, следовательно, появился осевой разбег ротора. Этот разбег должен быть небольшим (около 1 *мм* с каждой стороны), так как при большом разбеге возможно задевание ротора за неподвижные части двигателя. Поэтому такая конструкция требует повышенной точности производства и сборки деталей.

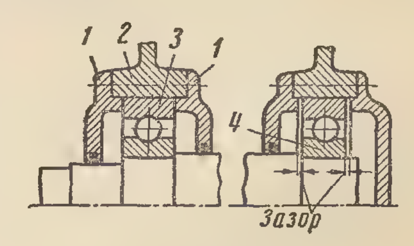


Рис. 9-58. Подшипниковые узлы на шарикоподшипниках.

В первых сериях электрических машин все подшипники качения вставляли в специальные втулки, называемые капсюлями для защиты от загрязнения подшипника при разборке машины. Однако капсюли усложняли конструкцию подшипникового узла и увеличивали эксцентриситет ротора по отношению к статору. Поэтому в современных

машинах капсюли применяют лишь в тех случаях, когда это необходимо. В качестве примера можно привести генератор типа СГ, в котором капсюль служит для возможности снятия подшипникового щита через якорь возбудителя, или машину П-104, где капсюль защищает подшипник качения при затяжке болтов, стягивающих головку разъемного стоякового подшипника.

В последнее время в машинах малой мощности все чаще применяют шарикоподшипники с защитными шайбами (см. рис. 9-13), которые дают возможность значительно упростить конструкцию подшипникового узла.

Расчет подшипников качения. Расчет подшипников качения заключается в определении срока работы их до износа (долговечность) в зависимости от скорости вращения и нагрузки. Зависимость между долговечностью, скоростью вращения и нагрузкой подшипника качения выражается следующей формулой:

$$Q\,(nh)^{0,3} = C, \qquad (9\text{-}126)$$

где n — номинальная скорость вращения, *об/мин*;

h — долговечность подшипника, *ч*;

C — постоянная данного типа подшипника, называемая коэффициентом работоспособности;

Q — условная нагрузка

$$Q = (R + mA)\,k_\delta,\ кГ, \qquad (9\text{-}127)$$

где R — радиальная нагрузка, рассчитанная при номинальном режиме работы машины без учета перегрузок.

При определении реакции подшипника надо выбирать наиболее неблагоприятные условия нагрузки подшипника.

Для реакции R_A принимаем направление силы P вверх, а для реакции R_B — вниз (см. рис. 9-27). Таким образом, нагрузка подшипника со стороны коллектора определяется по формуле

$$R_A = (G + T_0)\frac{b}{l} + P\frac{c}{l}, \qquad (9\text{-}128)$$

а нагрузка подшипника со стороны привода

$$R_B = (G + T_0)\frac{a}{l} + P\frac{l+c}{l}. \qquad (9\text{-}129)$$

В формуле (9-127) A выражает аксиальную нагрузку. Если нет явно выраженной аксиальной нагрузки, то принимают $A = 0{,}1\ R$, учитывая осевое магнитное притяжение ротора;

m — коэффициент приведения аксиальной нагрузки к радиальной; для радиальных шарикоподшипников $m = 1{,}5$;

k_δ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки; при постоянной спокойной нагрузке $k_\delta = 1$; при нагрузке со слабыми толчками $k_\delta = 1{,}5$; при нагрузке со значительными толчками $k_\delta = 2$; при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками $k_\delta = 3$.

Таким образом,

$$h = \frac{1}{n}\left(\frac{C}{Q}\right)^{\frac{10}{3}},\ ч. \qquad (9\text{-}130)$$

Расчетная долговечность шарико- и роликоподшипника должна быть порядка $h \geqslant (15 \div 20) \cdot 10^3$ *ч*.

В табл. XII-1 и XII-2 приведены размеры, коэффициенты работоспособности и максимальные скорости вращения для наиболее употребительных шарико- и роликоподшипников.

Пример расчета. Расчетные данные: $G = 8{,}8$ *кГ*; $T_0 = 26$ *кГ*; $a = 15$ *см*; $b = 15$ *см*; $c = 6$ *см*; $l = 30$ *см*; $m = 1{,}5$.

Расчет ведем для подшипника B, имеющего бóльшую нагрузку:

$$R_B = (8{,}8 + 26)\cdot\frac{15}{30} + 55\cdot\frac{30+6}{30} = 84\ кГ;$$

$$Q = (84 + 1{,}5\cdot 8{,}4)1{,}5 = 146\ кГ.$$

Приняв срок службы подшипника 15 000 *ч*, вычисляем:

$$C = (1\,420\cdot 15\,000)^{0,3}\cdot 146 = 23\,000.$$

При этом значении коэффициента работоспособности можно взять подшипник средней серии № 306, у которого внутренний диаметр соответствует диаметру шейки вала двигателя.

Второй подшипник рассчитывать не имеет смысла, так как по условиям унификации деталей он должен быть взят одинаковым с первым, а нагрузка его значительно меньше.

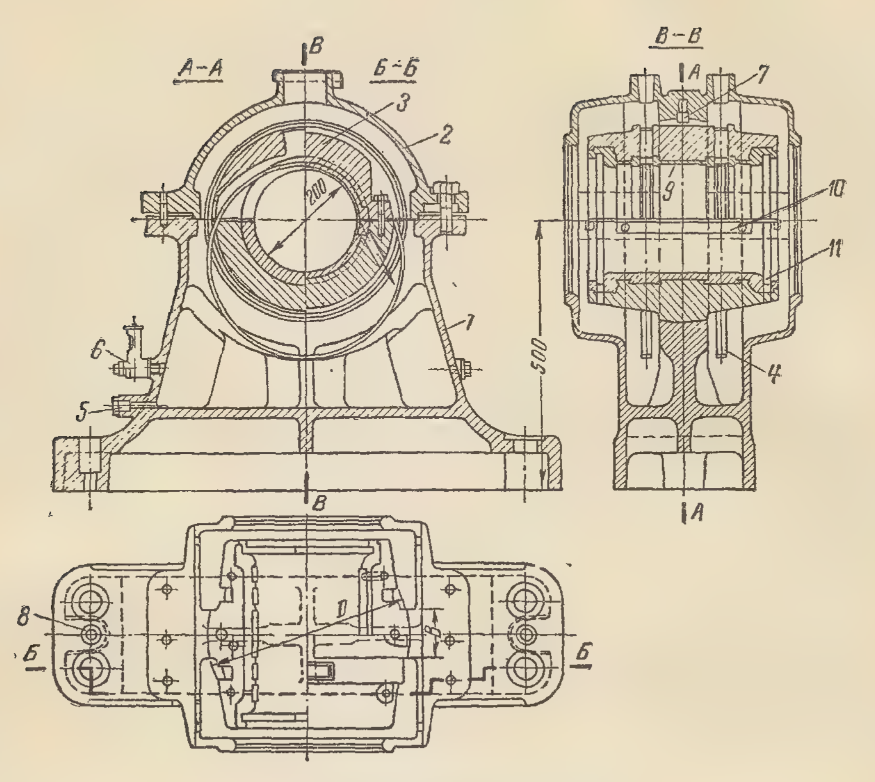


Рис. 9-59. Подшипник с кольцевой смазкой.

б) Подшипники скольжения. В начале развития электромашиностроения все машины выполнялись на подшипниках скольжения. Затем их начали вытеснять подшипники качения, сначала в малых быстроходных машинах, а затем и в машинах большей мощности. В настоящее время с подшипниками скольжения строят машины мощностью свыше 1 000 *квт* на стояковых подшипниках. Применение подшипников скольжения для крупных машин объясняется тем, что в этих машинах подшипники разъемные и требуется циркуляция большого объема масла для их охлаждения.

Электрические машины со скоростями вращения ниже 1 000 *об/мин* строят с кольцевой смазкой. На рис. 9-59 показана конструкция стоякового подшипника с кольцевой смазкой. Циркуляция масла, налитого в камеру подшипника, осуществляется двумя смазочными кольцами *4*, которые опираются на шейку вала, а нижние их части погружены в масло. При вращении вала смазочные кольца вовлекаются во вращение и начинают подавать масло на шейку вала. Из верхней точки вала масло по продольным распределительным канавкам *10* растекается по всей длине подшипника и попадает в узкую щель между шейкой вала и вкладышем подшипника. Вследствие прилипаемости масла к металлам в рабочем слое создается гидравлическое давление и шейка вала всплывает, отделяясь от поверхности вкладыша подшипника. Таким образом, создается жидкостное трение, при котором трение между металлами заменяется трением металлов о масло.

Для удобства монтажа стояковые подшипники *2* делают разъемными. Разъем вкладыша сделан по горизонтальному диаметру, а разъем головки подшипника несколько выше для предупреждения вытекания масла. В целях уменьшения изнашивания шейки вала при пусках и остановках, когда жидкостное трение нарушается, поверхность вкладыша, прилегающая к валу, за-

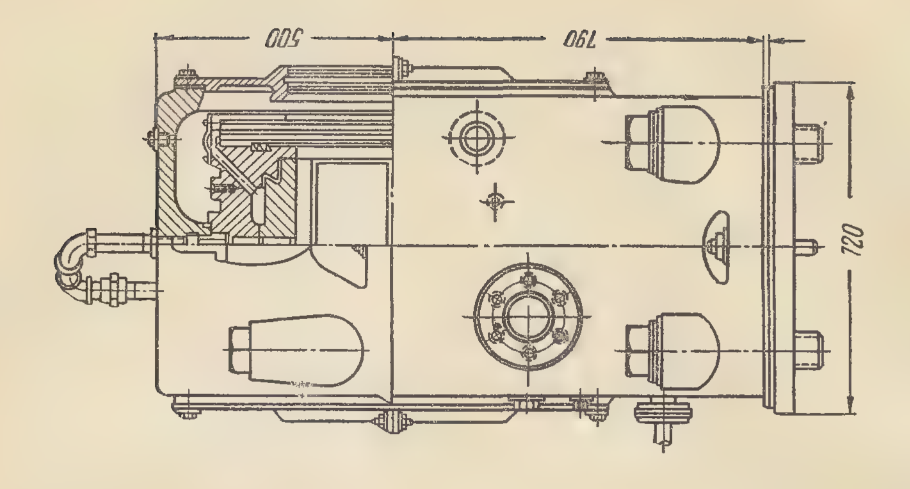


Рис. 9-60. Сегментный подшипник.

лита мягким антифрикционным металлом — баббитом *9*. Для лучшего сцепления баббитовой заливки с корпусом вкладыша последний имеет кольцевые канавки в форме ласточкина хвоста. Поверхность прилегания вкладыша к стояку подшипника шаровая с центром на оси шейки вала. Это дает возможность вкладышу при перекосах устанавливаться всегда по направлению оси шейки вала. Такие подшипники называются самоустанавливающимися. Для предохранения от проворачивания вкладыша в подшипнике служит стопорный винт *7*, головка которого входит в паз верхней половины вкладыша *3*. Наблюдение за вращением смазочных колец производят через специальные смотровые отверстия, закрытые крышками для защиты подшипника от попадания в него пыли.

Масло в подшипник наливают по уровню *6*, который снабжен смотровым стеклом. Спуск масла производят через отверстие, закрытое пробкой *5*, расположенное в нижней точке масляной камеры. Для предохранения от растекания масла вдоль вала за пределы подшипника служат маслоулавливающие канавки *11* с отверстиями в нижней части вкладыша. Они собирают масло по концам вкладыша, и через отверстия оно стекает обратно в масляную камеру.

Нагрузка подшипника характеризуется удельным давлением на вкладыш и скоростью вращения. Удельное давление на нижнюю несущую поверхность вкладыша определяют по формуле

$$q = \frac{R}{dl}, \ кГ/см^2. \qquad (9\text{-}131)$$

Оно должно быть в пределах 10—12 *кГ/см²*.

Для быстроходных машин применяют принудительную смазку, при которой масло подается к поверхностям трения специальными насосами. В машинах с принудительной смазкой предусматривается автоматическая система контроля за работой смазочной аппаратуры. При прекращении подачи масла срабатывает аварийный сигнал, и машина должна быть немедленно остановлена во избежание расплавления подшипников.

В табл. 9-7 приведены нормализованные размеры подшипников скольжения и допускаемые нагрузки при различных скоростях вращения. В таблице проведена ступенчатая

Допускаемые нагрузки на подшипники

Размеры, *мм*	Скорость					
	125	150	167	187	214	250
100×130						
110×130						
120×140						
130×140						
140×150						
150×150						
160×160						
180×180						2 200
200×200					2 650	2 900
220×220				3 150	3 350	3 650
250×250			4 250	4 400	4 650	4 950
280×280		5 350	5 550	5 800	6 100	6 600
300×300		6 300	6 600	6 900	7 300	7 800
350×350	8 500	9 100	9 550	10 000	10 500	11 400
400×400	11 500	12 500	13 000	13 600	14 400	15 500
450×450	15 500	16 500	17 300	18 000	19 000	20 500
500×500	20 000	20 500	22 300	23 200	24 600	26 500

жирная линия, которая разграничивает подшипники с кольцевой смазкой (слева от линии) и подшипники, требующие принудительной смазки.

Особую конструкцию представляют направляющие подшипники вертикальных машин, в первую очередь гидрогенераторов. Они заключены в масляную ванну (см. рис. 9-20), уровень масла в которой доходит примерно до середины вкладыша. Замкнутая система смазки освобождает от необходимости осуществлять сложную циркуляцию масла. Для отвода выделяемого в подшипнике тепла в масло погружены трубчатые маслоохладители, по которым циркулирует вода.

В подшипниках горизонтальных машин имеется только один масляный клин в нижней половине вкладыша. Наоборот, направляющие подшипники вертикальных машин имеют сегментные вкладыши, состоящие не менее чем из четырех сегментов. Соответственно увеличивается число масляных клиньев, отделяющих шейку вала от сегментов подшипников.

Применение сегментных подшипников в вертикальных машинах вызвано необходимостью регулировать ось валов турбины и генератора в вертикальной плоскости. Однако сегментные подшипники имеют существенные преимущества и в машинах с горизонтальным валом. Заводом «Электросила» построено несколько горизонтальных машин с сегментными подшипниками, которые хорошо себя зарекомендовали в работе.

На рис. 9-60 показано устройство сегментного подшипника.

в) Подпятники. В машинах с вертикальным валом осевую нагрузку воспринимают подпятники. В машинах малой мощности осевая нагрузка ложится на радиальный шарикоподшипник. В крупных вертикальных машинах с подшипниками скольжения применяют специальные подпятники. В гидрогенераторах подпятники представляют собой очень ответственный узел, на который приходятся огромные нагрузки, выражаемые в тысячах тонн. Эти нагрузки складываются из весов роторов турбины и генератора и веса столба воды, который давит на лопасти гидротурбины.

Подпятник гидрогенератора (см. рис. 9-21) состоит из стального массивного кольца, торцевая поверхность которого отполирована до вы-

Таблица 9-7

с кольцевой смазкой, *кГ*

вращения *n, об/мин*

300	375	428	500	600	750	1 000	1 500
		900	1 000	1 100	1 200	1 400	1 600
	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 600	1 900
	1 250	1 350	1 450	1 550	1 700	2 000	2 400
1 200	1 400	1 500	1 600	1 750	1 900	2 250	2 600
1 450	1 650	1 750	1 850	2 050	2 250	2 600	3 000
1 600	1 800	1 900	2 050	2 250	2 400	2 800	3 250
1 850	2 050	2 200	2 350	2 550	2 800	3 200	
2 450	2 700	2 900	3 100	3 350	3 700	4 200	
3 150	3 450	3 650	3 900	4 200	4 700	5 300	
3 950	4 300	4 600	4 850	5 400	5 900	6 600	
5 350	5 800	6 100	6 600	7 200	7 900		
7 150	7 750	8 200	8 750	9 400	10 400		
8 450	9 100	9 700	10 300	11 100	12 250		
12 200	13 400	14 000	15 000	16 000			
16 600	18 200	19 000	20 800	22 400			
22 000	24 100	25 600	27 300				
29 000	32 000	34 000					

сокой степени чистоты и называется зеркалом. Она опирается на ряд сегментов с рабочей поверхностью, залитой баббитом. Особую сложность представляет регулировка сегментов, при которой добиваются

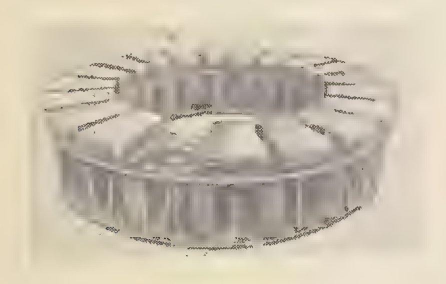


Рис. 9-61. Подпятник с болтовой регулировкой.

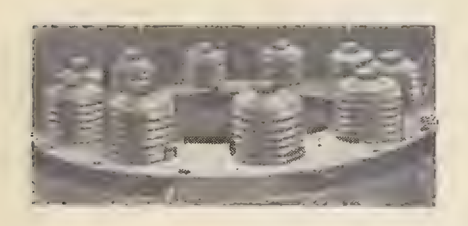


Рис. 9-62. Подпятник на гидравлической опоре.

горизонтальности положения зеркала подпятника и равномерного распределения нагрузки между сегментами. Долгое время эта регулировка производилась специальными болтами (рис. 9-61). Регулировка отнимала много времени и не всегда обеспечивала равномерную нагрузку сегментов. Вследствие этого приходилось ограничивать удельную нагрузку относительно небольшими пределами около 40 *кГ/см²*. Поэтому поверхность подпятника достигала огромных размеров.

Несколько лет назад на заводе «Уралэлектротяжмаш» была разработана и опробована новая конструкция подпятника на гидравлической опоре (рис. 9-62). Все сегменты опираются на масляные цилиндры, в которые нагнетают масло и затем заваривают. Таким образом, обеспечивается автоматическое распределение нагрузки между сегментами и удельное давление может быть значительно повышено.

9-12. ПОДШИПНИКОВЫЕ ЩИТЫ И СТОЯКОВЫЕ ПОДШИПНИКИ

Подшипниковые щиты служат для механического соединения подшипников со станиной. По расположению в машине различают передние подшипниковые щиты (со стороны коллектора или контактных колец) и задние (со стороны привода). Материалом для подшипниковых щитов чаще всего служит чугун, так как он дешев, хорошо заполняет формы и легко обрабатывается. Подшипниковые щиты трудно поддаются расчету на механическую прочность, поэтому толщину стенки приходится выбирать по технологическим соображениям, принимая во внимание удобство отливки и необходимую жесткость щита при обработке. Щиты со слишком тонкими стенками дают повышенный брак литья и коробятся при обработке на станках под действием кулачков патрона.

При проектировании подшипниковых щитов следует избегать резких переходов от тонких стенок к толстым, так как в этих местах неизбежно будут образовываться усадочные раковины. Все цилиндрические поверхности должны быть сделаны в виде усеченных конусов для облегчения выемки модели из земляной формы.

На рис. 9-63 показана конструкция чугунного подшипникового щита электродвигателя единой серии 8-го габарита. Для уменьшения веса щита предусмотрены четыре выступа для болтов, крепящих щит к станине и позволяющих уменьшить диаметр борта в промежутках между этими выступами. Плоскость выступов, обращенная к станине, отступает на 6 *мм* от плоскости борта, что дает возможность не обрабатывать их и тем самым уменьшить поверхность обработки с поперечной подачей резца. Для зажима щита в трехкулачковый патрон токарного станка на торце щита предусмотрены три технологических прилива. В нижней половине сделаны окна для забора охлаждающего воздуха.

Отверстие под шарикоподшипник диаметром 150 *мм* сделано

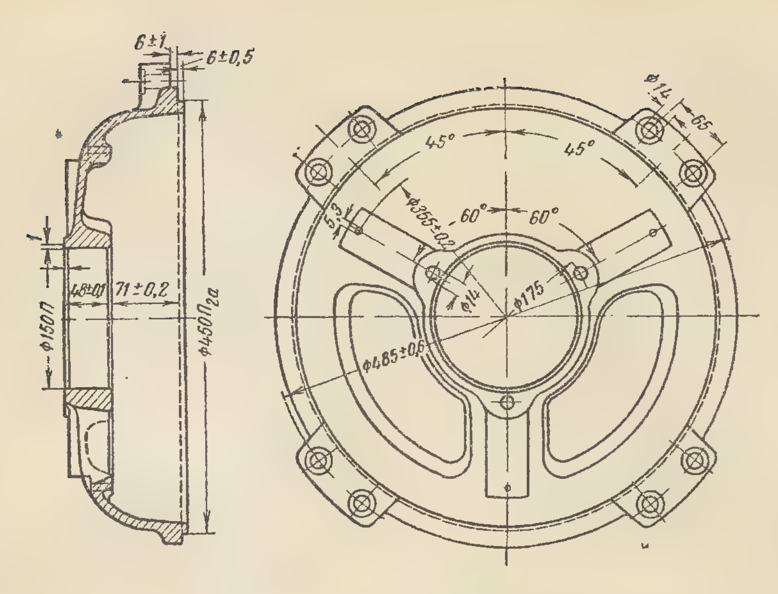


Рис. 9-63. Подшипниковый щит.

сквозным, т. е. открытым с обеих сторон, для удобства обработки щита и сборки подшипникового узла.

Соединение подшипникового щита со станиной носит название «замок». Если бортик подшипникового щита входит в расточку станины, то это называется внутренним замком. Если же подшипниковый щит надевается на наружную поверхность станины, то такое соединение называется наружным замком. В машинах малой и средней мощности обычно применяют внутренний замок (см. рис. 9-7 и 9-12), а в крупных машинах — наружный (рис. 9-15).

Крупные машины с наружным диаметром более 1 *м* выполняют на стояковых подшипниках. Стояковые подшипники устанавливают на общей плите со станиной. Очевидно, что равномерность зазора между статором и ротором будет зависеть от точности установки стояковых подшипников. Выверка зазора в вертикальной плоскости производится за счет прокладок из листовой стали под лапы стоякового подшипника или станины. Смещение ротора в горизонтальном направлении производится путем передвигания стояковых подшипников на плите. После выверки зазора и затяжки болтов в фундаментной плите засверливают и развертывают по два конических отверстия через лапы стояка и забивают в них установочные штифты. Благодаря штифтам при повторной сборке нет необходимости снова регулировать зазор.

В машинах большой мощности из-за несимметрии магнитной системы появляются подшипниковые токи, которые замыкаются через вал, стояки подшипников и фундаментную плиту. Эти токи разъедают поверхность вкладышей и шеек валов и приводят к быстрому старению масла в подшипниках. Для борьбы с подшипниковыми токами один из стояков изолируют от фундаментной плиты прокладками из гетинакса. Болты, головки болтов и установочные штифты изолируют изоляционными трубками и шайбами. Фланцы маслопроводов и водопроводов также должны быть изолированы.

9-13. СТАНИНЫ

Станиной называется остов машины, поддерживающий сердечник статора или полюсную систему. В машинах переменного тока станина имеет только механическое назначение, в то время как в машинах постоянного тока она служит также частью магнитопровода. В зависимости от назначения станины резко

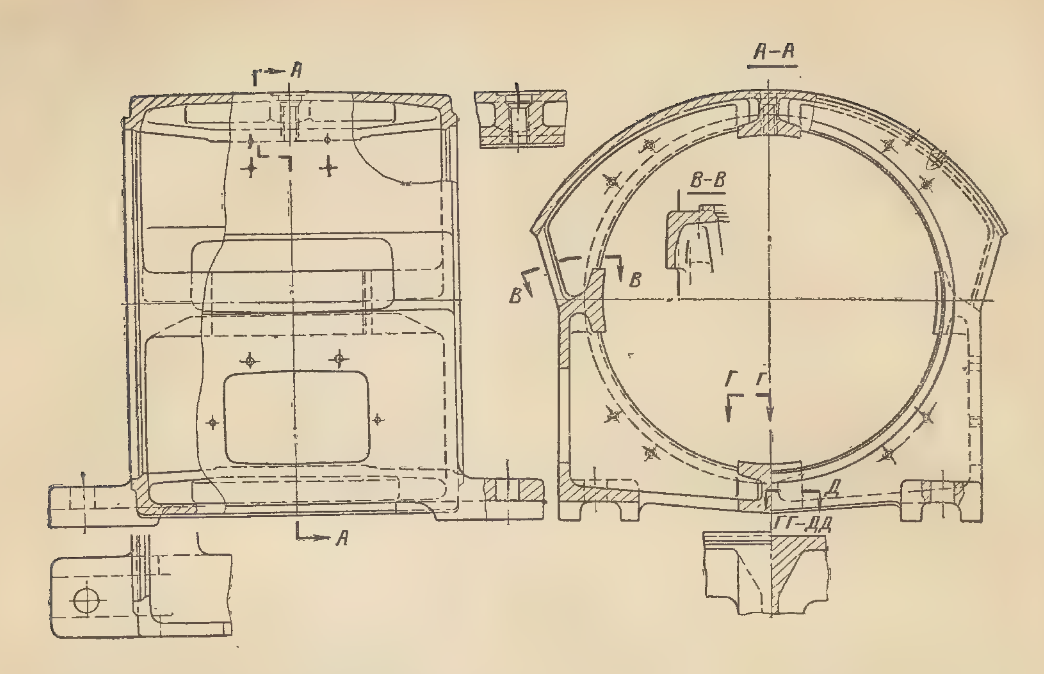


Рис. 9-64. Литая станина.

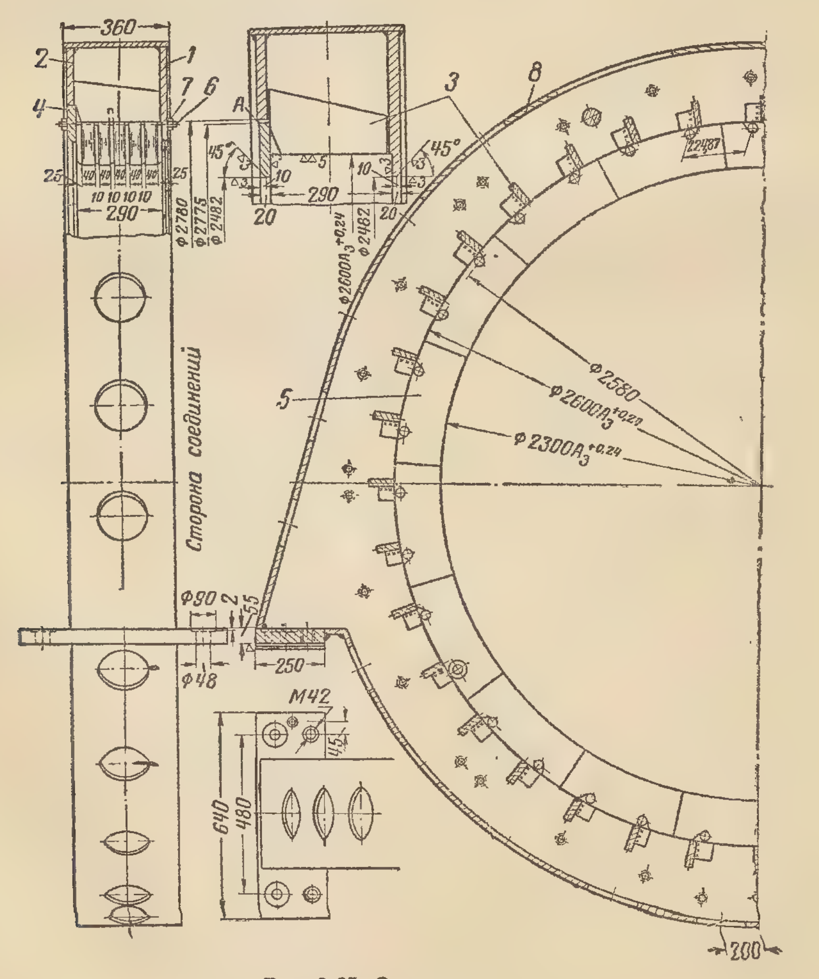


Рис. 9-65. Сварная станина.

меняются ее конструктивные формы, вес и применяемый материал. Станины машин переменного тока мощностью до 500—600 *квт* отливают из чугуна. Для придания станине необходимой жесткости при минимальном весе сечение ее выполняют корытообразной формы (рис. 9-64), а на внутренней окружности располагают продольные ребра для посадки сердечника статора. Промежутки между ребрами служат вентиляционными каналами.

Для машин мощностью 1 000 *квт* и выше применяют исключительно сварные станины, состоящие из продольных балок, приваренных к кольцам (рис. 9-65). Переход от литых станин к сварным дает значительную экономию в весе и трудоемкости обработки за счет уменьшения припусков. Однако при проектировании сварной станины надо учитывать соотношение между весом готовой детали и весом заготовок. Так, например, если узкое кольцо вырезать автогеном из квадратного листа стали, то коэффициент использования площади листа будет чрезвычайно низким, а расход металла значительно возрастет по сравнению с литой конструкцией. Поэтому узкие кольца сгибают из полосы или сваривают из нескольких частей, вырезанных из листа с минимальными отходами. Экономия веса сварных станин получается за счет того, что при выборе толщины стенок не приходится руководствоваться условиями заполнения формы жидким металлом. В сварных конструкциях надо также стремиться сократить длины сварочных швов и облегчить доступ к местам сварки.

Машины переменного тока обычно выполняются с неразъемными станинами, пока это допускается по условиям железнодорожных габаритов. Это объясняется тем, что при разъемных станинах приходится делать также разъемным сердечник статора; последнее усложняет конструкцию, вносит несимметрию в магнитную цепь и повышает магнитные потери в стыках. Эти трудности возрастают в крупных малополюсных машинах, у которых поток на полюс очень велик. Поэтому статоры турбогенераторов выполняют неразъемными по диаметру, хотя для их перевозки приходится применять специальные железнодорожные платформы.

Станины машин постоянного тока выполняют литыми из стали или сварными. Иногда применяют комбинированные конструкции, состоящие из литого обода с приваренными лапами.

Сечение станины можно разделить на магнитную часть и конструктивную часть. Длину магнитной части станины берут не более 1,5—2 длины полюса. При изготовлении станины из стальной трубы или выгибании ее из стального листа толщина стенки магнитной и конструктивной части станины будет одинаковой, что ведет к излишнему расходу металла на конструктивную часть. Это обстоятельство долгое время заставляло отдавать предпочтение литым станинам, которые могут быть отлиты с разными толщинами стенок. Внедрение сварки под слоем флюса легко позволяет применять заготовки разной толщины. Вследствие этого литые станины машин постоянного тока были вытеснены сварными. Литые станины сохранились лишь в машинах восьмигранной формы, какими являются крановые и некоторые типы тяговых электродвигателей постоянного тока.

В станинах, согнутых и сваренных из листовой стали, сварочный продольный шов должен быть расположен по линии главного полюса. Этим устраняется влияние повышенного сопротивления шва на магнитную цепь машины.

В машинах постоянного тока щетки устанавливают против главных полюсов. Поэтому не рекомендуется совмещать ось главных полюсов с вертикальной осью машины, так как будет затруднен доступ к нижним щеткодержателям.

Расположение отверстий для болтов, крепящих полюсы, должно быть выбрано таким, чтобы лапы не мешали сверлить эти отверстия и ввертывать болты. Расстояние от плоскости лап до центра станины

(высота центров) следует выбирать по ГОСТ 13267-67 (см. приложение X-1).

В противоположность машинам переменного тока машины постоянного тока делают с разъемными станинами уже при наружном диаметре около 1 *м* для удобства сборки и монтажа. Крановые двигатели постоянного тока при мощностях свыше 30 *квт* делают с разъемными станинами, благодаря чему можно производить их разборку и мелкий ремонт на ферме крана. Плоскость разъема обычно делают несколько выше центра, так как по горизонтальному диаметру расположены добавочные полюсы. Это позволяет не снимать полюсов при разборке машины. Междукатушечные соединения должны иметь разъемные контакты, которые обычно выносят на наружную поверхность станины.

В верхней половине станины предусматривают приливы или приваривают бобышки для ввертывания грузовых болтов, служащих для подъема машины при монтаже (см. табл. XI-1).

Болты, крепящие станину к основанию, подвергаются растягивающим усилиям под действием вращающего момента, так как неподвижная часть машины связана магнитным потоком с ротором или якорем. При этом вес машины противодействует ее опрокидыванию под действием вращающего момента. При вращении ротора генератора против часовой стрелки нагружаются болты с правой стороны, а при обратном вращении — болты с левой стороны (для двигателей — наоборот).

Таким образом, при передаче вращения через муфты, когда к концу вала приложен только вращающий момент, усилие P, растягивающее болты, можно определить из уравнения моментов относительно точки O (рис. 9-66)

$$M_{\text{макс}} - Gl_1 = Pl_2, \qquad (9\text{-}132)$$

откуда

$$P = \frac{M_{\text{макс}}}{l_2} - \frac{Gl_1}{l_2}, \ \text{кГ}, \qquad (9\text{-}133)$$

где G — вес машины, *кГ*;

$M_{\text{макс}}$ — максимальный вращающий момент, *кГ·см*; линейные размеры в сантиметрах, а напряжение в болтах

$$\sigma = P : n\frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{4P}{\pi n d_0^2}, \ \text{кГ/см}^2. \qquad (9\text{-}134)$$

Здесь: d_0 — внутренний диаметр резьбы, *см*;

n — число болтов в лапе.

Расчет станины на жесткость. Жесткость станины является необходимым условием надежной работы машины. Это особенно относится к асинхронным машинам, так как воздушный зазор в них мал и деформации станины могут вызвать недопустимые искажения равномерности зазора.

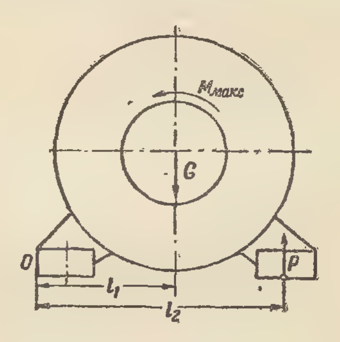


Рис. 9-66. К расчету болтов станины.

Прогиб станины может быть вызван передачей вращающего момента и односторонним магнитным притяжением.

Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = 97\,500\frac{P}{n}, \ \text{кГ·см}. \qquad (9\text{-}135)$$

Интенсивность окружного усилия

$$t = \frac{M_{\text{вр}}}{2\pi R}, \ \text{кГ/рад}. \qquad (9\text{-}136)$$

Одностороннее магнитное притяжение

$$Q = 0{,}3Dl, \ \text{кГ} \qquad (9\text{-}137)$$

Интенсивность магнитного притяжения

$$q = \frac{Q}{\pi}, \ \text{кГ/рад}. \qquad (9\text{-}138)$$

Размеры a, R и α показаны на рис. 9-67. Податливость станины

$$e = \frac{R^3}{EI_x}, \text{ см/кГ}. \quad (9\text{-}139)$$

Прогиб станины от вращающего момента при номинальной нагрузке

$$\Delta_t = et\left(\lambda_t - 5\frac{a}{R}\lambda'_t\right), \text{ см}. \quad (9\text{-}140)$$

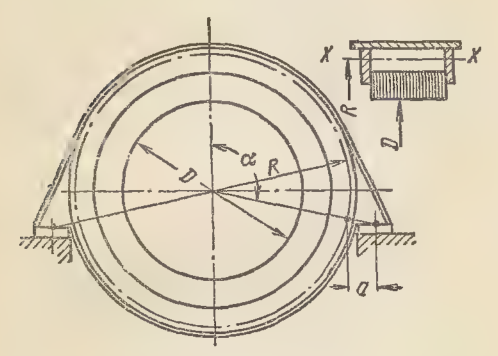


Рис. 9-67. К расчету жесткости станины.

Прогиб станины от одностороннего магнитного притяжения

$$\Delta_q = eq\left(\lambda_q - 5\frac{a}{R}\right)\lambda'_q, \text{ см}. \quad (9\text{-}141)$$

Коэффициенты для максимальных деформаций как функции угла α даны на рис. 9-68.

Суммарный прогиб при номинальной нагрузке

$$\Delta = \Delta_t + \Delta_q, \text{ см}. \quad (9\text{-}142)$$

Суммарный прогиб при перегрузке

$$\Delta_к = K\Delta_t + \Delta_q, \text{ см}, \quad (9\text{-}143)$$

где коэффициент перегрузки K выбирается так же, как при расчете вала (см. § 9-7).

Допускается величина прогиба при перегрузке в пределах 3—5% воздушного зазора, что и служит критерием жесткости станины.

Пример расчета. Асинхронный двигатель мощностью 1 300 *квт*, $n_{синхр} = 500$ *об/мин*; $D = 1\,200$ *мм*; $J = 3\,400$ *см*^{4}; $a = 150$ *мм*; $R = 900$ *мм*; $\delta = 1{,}5$ *мм*; $l = 360$ *мм*; $\alpha = 110°$.

$$M_{вр} = \frac{97\,500 \cdot 1300}{500} = 250\,000 \text{ кГ·см};$$

$$t = \frac{250\,000}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 90} = 440 \text{ кГ/рад};$$

$$Q = 0{,}3 \cdot 120 \cdot 36 = 1\,300 \text{ кГ};$$

$$q = \frac{1\,300}{3{,}14} = 415 \text{ кГ/рад};$$

$$e = \frac{90^3}{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 3\,400} = 0{,}0001;$$

$$\frac{a}{R} = \frac{150}{900} = 0{,}167;$$

$$\Delta_t = 0{,}0001 \cdot 440\,(0{,}1 - 5 \cdot 0{,}167 \cdot 0{,}082) = 0{,}0014 \text{ см};$$

$$\Delta_q = 0{,}0001 \cdot 415\,(0{,}08 - 5 \cdot 0{,}167 \cdot 0{,}016) = 0{,}0028;$$

$$\Delta_к = 2 \cdot 0{,}0014 + 0{,}0028 = 0{,}0056 \text{ см};$$

это составляет 3,7% зазора, т. е. жесткость станины является достаточной.

9-14. КОНСТРУКЦИИ СТАТОРОВ

Статоры машин переменного тока собираются из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм* с двусторонним покрытием лаком. Крайние листы штампуют из стали толщиной 1 *мм* или сваривают попарно точками из средних листов.

Статоры машин с наружным диаметром до 493 *мм* собирают отдельно от станины на цилиндрическую оправку, спрессовывают и скрепляют скобами, которые приваривают к пакету статора электросваркой. В таком виде пакеты обматывают и пропитывают, а затем впрессовывают в расточку станины. Статоры большего диаметра набирают в станину, спрессовывают между двумя нажимными шайбами и запирают шпонками, которые вставляют в канавки, проточенные в ребрах станины.

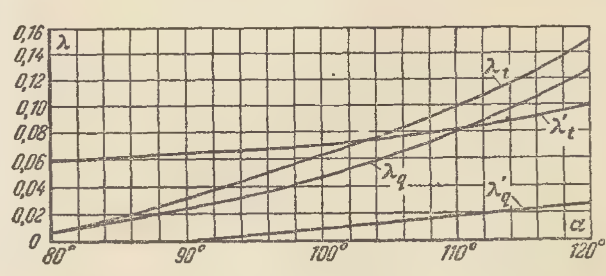


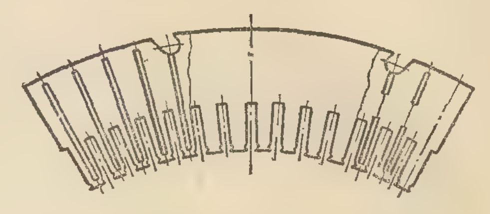
Рис. 9-68. Графики деформаций станины.

Если машина выполняется с радиальной вентиляцией, то сердечник статора разделяется на отдельные пакеты с вентиляционными каналами между ними шириной 10 *мм*. Каналы образуются путем приварки к листам, ограничивающим канал, распорок — обычно двутаврового сечения. Крайние пакеты делают толщиной 55 *мм*, так как они лучше охлаждаются, а средние толщиной 45 *мм*.

При разработке единых серий асинхронных электродвигателей для двигателей первых трех габаритов применена конструкция статора, залитого в алюминиевую оболочку, заменяющую станину (см. рис. 9-6). Заливка пакета статора в алюминиевую оболочку производится на машинах для литья под давлением в стальные формы, что значительно повышает производительность труда по сравнению с отливкой чугунных станин в земляные формы. Кроме того, отпадает обработка внутренней поверхности станины. Толщина стенки оболочки может быть очень тонкой, порядка 2—3 *мм*, так как пакет статора придает ей необходимую жесткость. Таким образом, достигается экономический эффект, несмотря на то, что алюминий дороже чугуна. Литые или штампованные лапы привертывают к статору винтами. Подшипниковые щиты таких двигателей также отливают под давлением из алюминия.

При максимальной ширине листа электротехнической стали 1 000 *мм* наибольший внешний диаметр статора, который может собираться из целых листов, составляет 990 *мм*. Сборка статоров машин бо́льших размеров производится из отдельных частей, которые получили название сегментов (рис. 9-69). Различают слоевую шихтовку, при которой каждый слой состоит из целого числа сегментов, и винтовую, при которой в каждом слое последний сегмент перекрывает первый на несколько пазовых делений. Условия проектирования статоров из сегментов подробно изложены в гл. 14.

При штамповке сегментов коэффициент использования площади листа электротехнической стали получается значительно более высоким, чем при штамповке круглых листов, так как сегменты располагаются в полосе так, что в вогнутую часть одного сегмента вписывается выпуклая часть соседнего. Для обеспечения безотходного раскроя листов электротехнической стали на полосы надо, чтобы наибольшая


Рис. 9-69. Сегмент статора.

хорда сегмента была равна или близка к нормализованным диаметрам статоров (см. приложение I). Внешняя и внутренняя хорды сегмента имеют размеры на 0,2—0,3 *мм* меньшие, чем хорды дуг центрального угла. Это делается для того, чтобы можно было боковым смещением сегментов добиваться гладкой поверхности пазов при сборке пакетов на пазовые оправки.

В старых конструкциях сегменты статора надевали на шпонки в форме ласточкина хвоста. Теперь такая конструкция сохранилась только в самых крупных машинах мощностью в сотни тысяч киловатт. В машинах мощностью до 10 000 *квт* применяется более простая конструкция крепления сегментов. Сегмент (рис. 9-69) имеет две открытые прорези на наружной окружности, которыми он надевается на круглые шпильки, вваренные в станину. Для надевания сегмента на шпильки его надо слегка согнуть. Такой способ значительно снижает трудоемкость сборки сердечника, так как не приходится прогонять каждый сегмент по всей длине станины. В собранном статоре сегменты удерживаются силой трения, которая возникает под действием давления стягивающих шпилек. Количество и диаметр шпилек определяют по силе прессовки сердечника.

Сила прессовки

$$Q = p\frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_\text{п}^2\right),\ кГ, \quad (9\text{-}144)$$

где p — удельное давление между листами 8—12 $кГ/см^2$;

D — внешний диаметр статора, *см*;

$D_\text{п}$ — диаметр статора по серединам пазов, *см*.

Число шпилек

$$n = Q : \sigma\frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{4Q}{\sigma\pi d_0^2}, \quad (9\text{-}145)$$

где d_0 — внутренний диаметр резьбы.

Допускаемое напряжение 1 600 $кГ/см^2$ для шпилек из стали марки Ст. 3 и 2 100 $кГ/см^2$ для шпилек из стали марки Ст. 5.

Для укрепления лобовых частей обмотки статора, которые подвергаются воздействию больших электромагнитных сил при коротких замыканиях, применяются бандажные кольца. Необходимость установки колец определяется по кривой (рис. 9-70). Если длина вылета при данной глубине паза лежит выше кривой, то установка бандажных колец необходима. Обычно для удобства укладки и выравнивания лобовых частей обмотки во всех машинах с внешним диаметром статора более 1 *м* независимо от проверки по кривой на рис. 9-70 устанавливают бандажные кольца. Количество бандажных колец m определяется из расчета одно кольцо на каждые 100 *мм* вылета лобовых частей. Сечение колец выбирают из расчета растягивающего усилия

$$Q = \frac{0{,}113}{m} \cdot \frac{D}{2px},\ кГ, \quad (9\text{-}146)$$

а напряжение на растяжение в кольце

$$\sigma = \frac{4Q}{\pi d^2},\ кГ/см^2. \quad (9\text{-}147)$$

Для колец из стали марки Ст. 3 допускается напряжение 600 $кГ/см^2$.

Значения x: для синхронных машин $x = 0{,}2 \div 0{,}3$; для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором $x = 0{,}15 \div 0{,}25$; для асинхронных машин с фазным ротором $x = 0{,}25 \div 0{,}4$.

Рекомендуемые размеры бандажных колец: для машин с D до 1 *м* — круглые ∅ 12 и 16 *мм*; для машин с D более 1 *м* — круглые ∅ 16, 20, 25 и 30 *мм* или квадратные 22×22 и 32×32 $мм^2$.

Способы крепления бандажных колец показаны на рис. 9-16, 9-20 и 9-24.

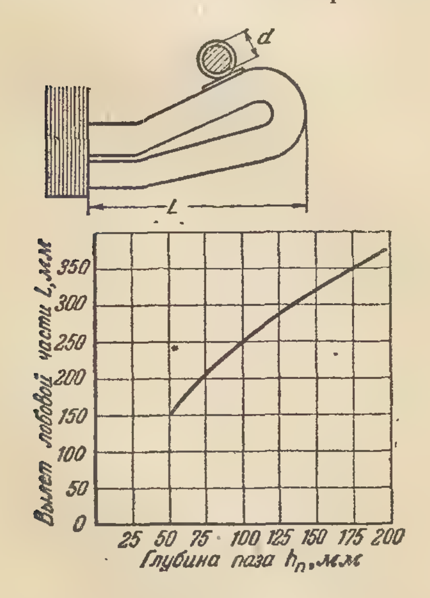


Рис. 9-70. К расчету бандажных колец обмотки.

9-15. ПОЛЮСЫ

Главные полюсы машин постоянного тока штампуют из листовой стали толщиной от 1 до 2 *мм*. В старых типах электрических машин сердечники полюсов отливали вместе со станиной и к ним привертывали винтами полюсные наконечники, собранные и склепанные из штампованных листов. В современных машинах полюсы целиком штампуют из листовой стали и привертывают к станине болтами (см. рис. 9-3 и 9-4). Такое конструктивное выполнение упрощает форму станины и позволяет более удобно надевать катушки на полюсы отдельно от станины.

Для заклепок, которыми скрепляются листы полюса, предусматриваются в листах отверстия, диаметры которых делают больше диаметра заклепки на 0,15 *мм* при диаметрах 8 *мм* и на 0,2 *мм* при

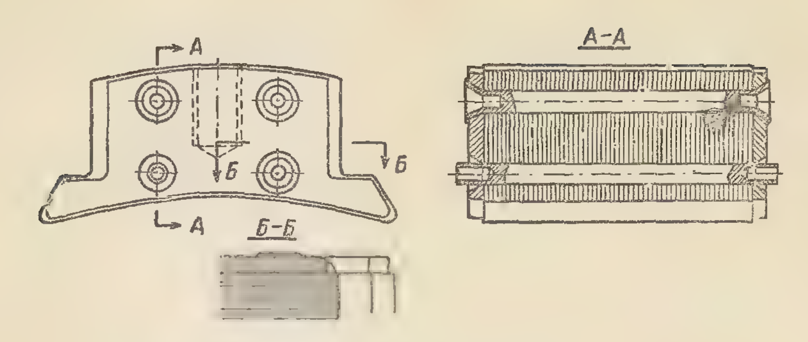


Рис. 9-71. Главный полюс.

диаметрах свыше 8 *мм.* Слишком большие зазоры приводят к изгибу заклепки и сдвигам листов полюса.

Заклепки представляют собой цилиндрические стержни, засверленные с обоих концов. При прессовке полюса концы заклепок развальцовывают в конических углублениях полюсных боковин, которые штампуют из листовой стали толщиной 4—6 *мм* (рис. 9-71). Для предохранения от выступания контура полюсных боковин за плоскость листов боковины штампуют меньшего размера по контуру, вписанному в контур полюсных листов. Сдвиг контуров делают на 1,5—2 *мм*, а по боковым сторонам полюса — на толщину боковины. Благодаря этому уменьшается количество стружки, снимаемой при обработке углов сердечника.

Для крепления к станине в полюсах сверлят и нарезают отверстия для болтов. Однако резьба получается неровной, так как каждая нитка ее пересекает несколько листов полюса. При недостаточной плотности прессовки листов резьба может быть механически ненадежной. Листы, сквозь которые проходит болт, могут вытягиваться из пакета полюса, отчего спинка полюса, прилегающая к станине, получает ступенчатую форму, а в промежутках между болтами и по краям полюса образуется дополнительный воздушный зазор. Нарезание резьбы в полюсах производится вручную, что отнимает много времени.

Все указанные недостатки устраняются в конструкции полюса, изображенной на рис. 9-72. В листах полюса штампуют отверстия, а при сборке полюса в них вставляют стержень с заранее нарезанными в нем отверстиями, в которые ввертывают болты, притягивающие полюс к станине. Благодаря наличию стержня все листы полюса равно-

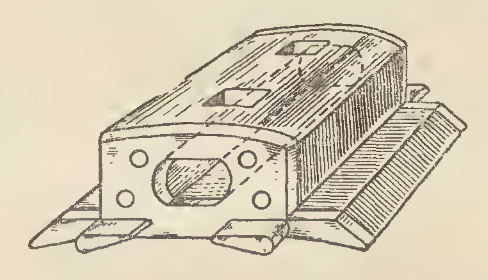


Рис. 9-72. Главный полюс со стержнем.

мерно притягиваются болтами к стенке станины, а резьба в сплошном стержне получается более прочной и может быть нарезана на станке. Для образования отверстий, через которые должен проходить болт, штампуют листы с вертикальными каналами. Эти листы при сборке полюса укладывают с таким расчетом, чтобы над отверстиями стержня образовались квадратные каналы в теле полюса. Полюсы со стержнями получили широкое распространение в крупных машинах, а также в машинах, работающих в условиях тряски.

На рис. 9-73 изображены две формы добавочных полюсов, которые выполняются в виде стальных отливок или полос проката. У полюса (рис. 9-73, *а*) ширина полюсного наконечника больше, чем ширина сердечника. Выступы образуются

в полюсах из стальной полосы путем обработки боковых сторон, а в литых — путем формовки. Для уменьшения объема обработки стремятся ширину полюсного наконечника сделать равной ширине сердечника полюса. Однако и при этом приходится обрабатывать торцы полюса, чтобы обеспечить выступы для поддержки катушек. Полное устранение обработки полюса достигается путем сборки его из штампованных листов, как это сделано в серии П машин постоянного тока (см. рис. 9-1). На рис. 9-73, *б* изображен полюс, применяемый в машинах с узкой зоной коммутации. Поэтому ширина полюсного наконечника меньше ширины сердечника полюса. Для поддержания катушки к боковым сторонам полюса приклепаны два угольника, вертикальные полки которых входят в уступы, профрезерованные в полюсе. Для уменьшения рассеяния угольники сделаны из немагнитного материала.

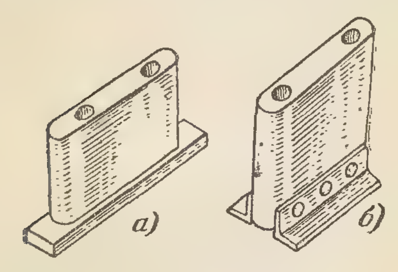


Рис. 9-73. Добавочные полюсы.

Ввиду того что спинка добавочного полюса узкая, нет необходимости придавать ей форму дуги. Зазор между серединой плоской спинки и расточкой станины не превышает десятых долей миллиметра, и на такую же величину уменьшается зазор между якорем и добавочным полюсом. При этом отпадает операция обработки спинки и полюс делается более устойчивым, так как углы являются гарантированными точками опоры, в то время как при цилиндрической поверхности спинки полюс может установиться косо за счет неровностей поверхности или перекоса оси отверстия для болта.

Полюсы синхронных машин были подробно описаны в § 9-8.

а) **Расчет крепления главных полюсов.** Иногда расчет полюсных болтов ведут на растягивающее усилие, равное сумме веса полюса с катушкой и магнитного притяжения. Такой расчет принципиально ошибочен. Магнитное притяжение полюса якорем вообще не должно учитываться; он одновременно притягивается к станине и притом с большей силой, так как индукция в сердечнике полюса всегда больше, чем индукция в зазоре. Что касается веса полюса, то он значительно меньше, чем сдвигающее усилие от действия вращающего момента. Расчет ведут для полюса, расположенного по горизонтальному диаметру станины, так как его болты находятся в наименее выгодных условиях, ввиду того что составляющая веса и сдвигающее усилие от вращающего момента алгебраически складываются (рис. 9-74).

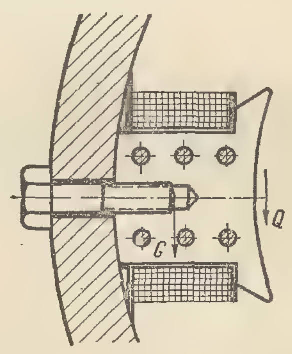


Рис. 9-74. К расчету крепления главного полюса.

Максимальный вращающий момент

$$M_{макс} = K \cdot 97\,500 \frac{P}{n}, \quad кГ \cdot см, \quad (9\text{-}148)$$

где K — коэффициент перегрузки из (9-16).

Окружное усилие, сдвигающее полюс,

$$Q = \frac{M_{макс}}{pD}. \quad (9\text{-}149)$$

Необходимая площадь сечения болтов полюса по внутреннему диаметру резьбы

$$F_0 = 5\frac{Q + G_{г.п}}{R}, \quad см^2, \quad (9\text{-}150)$$

где R — допускаемое напряжение на растяжение болта; с запасом принимается порядка 600 $кГ/см^2$;

$G_{гл}$ — вес полюса с катушкой.

Размер болта по внутреннему диаметру резьбы при числе болтов на полюс m

$$d_0 = \sqrt{\frac{4F_0}{m\pi}}. \qquad (9\text{-}151)$$

Общая площадь заклепок для спрессовки полюса принимается равной 0,02 площади листа полюса.

б) **Расчет крепления добавочных полюсов.** Добавочные полюсы не участвуют в передаче вращающего момента, но между ними и соседними главными полюсами возникают силы магнитного притяжения, которые составляют основную нагрузку на болты. Учитывая, что основание добавочного полюса значительно у́же, чем у главного полюса, приходится проверять полюс, кроме сдвига, также на опрокидывание. В наиболее невыгодных условиях находятся болты полюса, расположенного по горизонтальному диаметру станины, для которых и ведется расчет.

Для расчета крепления добавочных полюсов надо взять из электромагнитного расчета машины значения н. с. главного полюса $F_{г.п}$ и добавочного полюса $F_{д.п}$ при перегрузке.

Равнодействующая сила взаимодействия между концом добавочного полюса и башмаками соседних главных полюсов (рис. 9-75)

$$Q_1 = hL\frac{F_{г.п}F_{д.п}}{4\cdot 10^6 l_1^2},\ кГ. \qquad (9\text{-}152)$$

Равнодействующая сила взаимодействия между сердечником добавочного полюса и сердечниками соседних главных полюсов

$$Q_2 = (H - l)L\frac{F_{г.п}F_{д.п}}{18\cdot 10^6 l_2^2}. \qquad (9\text{-}153)$$

Расчетное натяжение болтов добавочного полюса, при котором сила трения между станиной и полюсом обеспечивает отсутствие сдвига полюса,

$$P' = 1{,}2\frac{Q_1 + Q_2 + G_{д.п}}{0{,}2},\ кГ. \qquad (9\text{-}154)$$

Расчетное натяжение болтов добавочного полюса, которое обеспечивает отсутствие опрокидывания полюса,

$$P'' = 1{,}2\frac{H}{0{,}5a}(0{,}9Q_1 + 0{,}7Q_2 + 0{,}5G_{д.п}),\ кГ. \qquad (9\text{-}155)$$

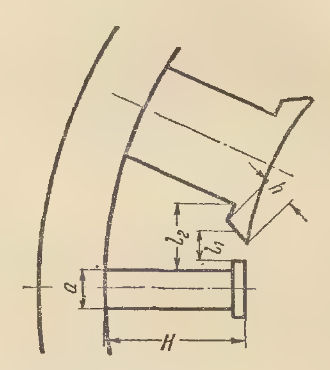


Рис. 9-75. К расчету крепления добавочного полюса.

Расчет болтов ведется по наибольшему значению натяжения по формулам (9-154) и (9-155).

Внутренний диаметр резьбы болта при допускаемом напряжении $P = 600\ кГ/см^2$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4P}{m\pi R}},\ см \qquad (9\text{-}156)$$

Примеры расчетов. Расчеты крепления главных и добавочных полюсов для машины П-104 (см. рис. 9-3).

Расчетные данные: $P_н = 325$ *квт*; $n = 1\,000$ *об/мин*; $2p = 6$; $D = 590$ *мм*; $G_{г.п} = 85$ *кГ*; $G_{д.и} = 30$ *кГ*; $m = 2$; $F_{г.п} = 8\,000$ *а*; $F_{д.п} = 18\,000$ *а*; $H = 155$ *мм*; $L = 290$ *мм*, $a = 38$ *мм*; $h = 20$ *мм*; $l_1 = 45$ *мм*; $l_2 = 85$ *мм*.

Расчет болтов главного полюса:

$$M_{вр.макс} = 2\cdot 97\,500\cdot\frac{325}{1\,000} = 63\,200\ кГ\cdot см;$$

$$Q = \frac{63\,000}{3\cdot 59} = 356\ кГ;$$

$$F_0 = 5\cdot\frac{356 + 85}{600} = 3{,}8\ см^2;$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4\cdot 3{,}8}{2\cdot 3{,}14}} = 1{,}55\ см.$$

Это соответствует диаметру болта М18.
Расчет болтов добавочного полюса:

$$Q = 2\cdot 29\cdot \frac{8\,000\cdot 18\,000}{4\cdot 10^6\cdot 4{,}5^2} = 100\ \kappa\Gamma;$$

$$Q_2 = 13{,}5\cdot 29\cdot \frac{8\,000\cdot 18\,000}{18\cdot 10^6\cdot 8{,}5^2} = 44\ \kappa\Gamma;$$

$$P' = 1{,}2\cdot \frac{100+44+30}{0{,}2} = 1\,050\ \kappa\Gamma;$$

$$P'' = 1{,}2\cdot \frac{15{,}5}{0{,}5\cdot 3{,}8}(90+31+15) = 1\,330\ \kappa\Gamma;$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4\cdot 1\,330}{2\cdot 3{,}14\cdot 600}} = 1{,}2\ c\text{м}.$$

Это соответствует диаметру болта М14. При небольшом расхождении в диаметрах болтов главного и добавочного полюсов их берут одинаковыми в целях унификации болтов и упрощения сверления станины.

9-16. ЩЕТКИ И ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛИ

В современных электрических машинах применяются исключительно прессованные щетки из угольных и графитовых порошков с прибавлением меди для щеток машин переменного тока. Электрические и механические свойства щеток, а также стандартизованные размеры их приведены в приложении V.

Для лучшего контакта между щеткой и обоймой щеткодержателя верхнюю часть щетки покрывают слоем меди гальваническим способом. При проектировании щеткодержателей необходимо применять ограничители опускания щетки при ее срабатывании так, чтобы ни в каком случае омедненная часть щетки не могла коснуться коллектора. Почти все щетки изготовляются с медными плетеными канатиками для отвода тока от щетки к неподвижной части щеткодержателя. Канатики заделывают в щетку на заводе-изготовителе; они имеют на конце припаянные кабельные наконечники. Выводные канатики и латунные обоймы щеток называются щеточной арматурой. Самым надежным способом заделки конца канатика в теле щетки является конопатка его при помощи специальной иглы и медного порошка, который заполняет кольцевое пространство между отверстием щетки и проводником. Применявшиеся ранее способы приклепывания или припайки канатика к щетке является значительно менее надежными.

Для направления щеток и осуществления нажатия их на коллектор или контактные кольца служат щеткодержатели. Общие принципы, которыми следует руководствоваться при конструировании щеткодержателей, заключаются в следующем:

а) максимальная унификация деталей;

б) создание достаточной жесткости конструкции, исключающей возникновения резонанса между собственными колебаниями щеткодержателя и колебаниями от вибрации щеток;

в) минимальные трение и инерция подвижных частей;

г) шунтирование пружины и подвижных частей щеткодержателя при помощи щеточного канатика;

д) свободное передвижение щетки в обойме без значительных качаний;

е) удобная смена щеток после износа.

Из всех деталей электрических машин щеткодержатели имеют наибольшее количество конструктивных разновидностей. Однако по принципу устройства их можно подразделить на относительно небольшое число типов:

1) щеткодержатели с непосредственным давлением пружины на щетку;

2) щеткодержатели зажимного типа;

3) радиальные щеткодержатели;

4) реактивные щеткодержатели;

5) сдвоенные щеткодержатели.

Щеткодержатели с непосредственным давлением пружины на щетку применяются только в микромашинах (рис. 9-76). При токе до 1 *а* щетки делаются без выводного канатика, а при больших токах снабжаются канатиком, который проходит через середину пружины. Такая конструкция является очень компактной, щетка имеет надежное направление в гнезде и обладает высокой степенью подвижности. Недостатком конструкции являются не-

возможность наблюдения за работой щетки, а также уменьшение давления щетки на коллектор по мере ее изнашивания.

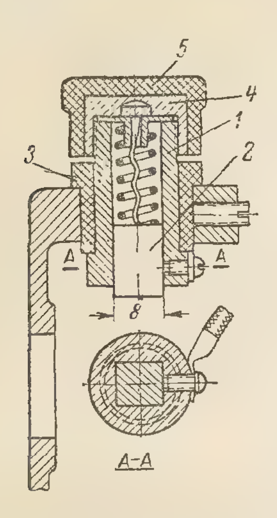


Рис. 9-76. Щеткодержатель с непосредственным давлением пружины.

Щеткодержатель микродвигателя состоит из латунной втулки *1* с квадратным гнездом для щетки *2*. Снаружи латунная втулка опрессована пластмассой *3* и впрессована в подшипниковый щит или станину микродвигателя. Верхняя часть втулки имеет резьбу, на которую навертывается латунный колпачок *4*, который снаружи также опрессован пластмассой *5*.

Щеткодержатель зажимного типа (рис. 9-77) первоначально применялся во всех машинах как переменного, так и постоянного тока. Однако он имеет значительные недостатки и поэтому в настоящее время сохранился лишь в асинхронных двигателях небольшой мощности.

Щетка *1* зажата в гнезде обоймы винтом *2*. Обойма представляет собой одно целое с поворотным рычагом *3*, который может поворачиваться вокруг хомутика *6*, зажатого винтом на пальце щеткодержателя. Щетка прижимается к кольцу пружиной *4*; нажатие ее регулируют гайкой *8*. Ток от щетки передается по гибкому канатику *7* к хомутику *6*, а от него через кабель *5* отводится на зажимы машины. Рычаг *3* щеткодержателя состоит из двух штампованных пластин, соединенных перегородками. Щеткодержатели разных контактных колец надеты на общий палец, поэтому он должен быть изолирован, что достигается опрессовкой его миканитом или бакелизированной бумагой.

При большом токе ротора на каждом контактном кольце приходится ставить много щеток по окружности и для щеткодержателей зажимного типа не хватит места. Поэтому в крупных машинах ставят щеткодержатели типа щеткодержателей машин постоянного тока, с той лишь разницей, что щетки устанавливают длинной стороной по окружности контактного кольца, а не по образующей коллектора, как это имеет место в машинах постоянного тока.

Наиболее распространенным типом щеткодержателей машин постоянного тока является радиальный щеткодержатель (рис. 9-78),

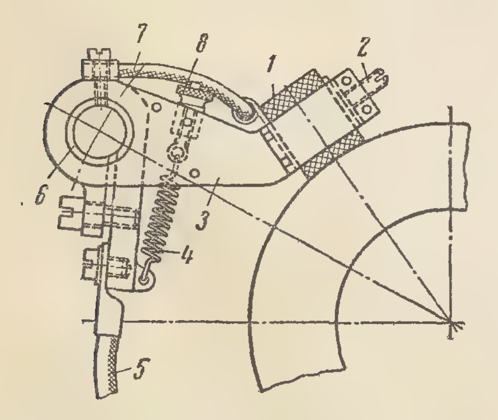


Рис. 9-77. Щеткодержатель зажимного типа.

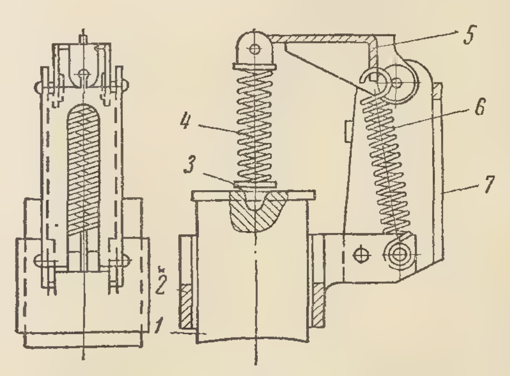


Рис. 9-78. Радиальный щеткодержатель.

у которого щетка подвижно вставлена в обойму, а направление ее совпадает с продолжением радиуса коллектора, откуда щеткодержатель получил свое название.

Давление на щетку *1* создается пружиной *6* и передается через рычаг *5* и пружину *4*, которая служит буфером и обеспечивает эластичность работы щеткодержателя. Верхний конец пружины *4* шарнирно соединен с рычагом *5*; в нижний ее конец ввернут на резьбе фарфоровый наконечник *3*, который вставлен в углубление, просверленное в щетке. Фарфоровый наконечник препятствует протеканию тока через пружину, что могло бы нарушить ее эластичность вследствие отпуска. Щетка вставлена в обойму *2*, которая отлита из латуни и прикреплена к корпусу *7* щеткодержателя, представляющему собой штампованную коробочку из листовой стали. В задней стенке корпуса сделана продолговатая прорезь, позволяющая опускать щеткодержатель после проточки коллектора, чтобы расстояние от поверхности коллектора до обоймы щеткодержателя оставалось неизменным. Характерной особенностью конструкции этого щеткодержателя является отсутствие регулировки натяжения пружины. Кинематика его выполнена так, что по мере срабатывания щетки длина пружины *6* уменьшается, но плечо ее относительно точки вращения рычага *5* увеличивается. Поэтому момент пружины, а следовательно, усилие давления на щетку остается неизменным как для новой, так и для изношенной щеток. Отсутствие регулировки упрощает обслуживание щеткодержателей и обеспечивает одинаковое давление всех щеток на коллектор.

Щеткодержатели радиального типа применяют для реверсивных машин, так как условия работы щетки не зависят от направления вращения коллектора. Для генераторов с постоянным направлением вращения лучшие условия для контакта создаются при наклоне щетки в сторону вращения коллектора (рис. 9-79). Этот щеткодержатель получил название реактивного, так как реакция силы давления щетки на коллектор с учетом трения направлена вдоль оси щетки и она не перекашивается в обойме.

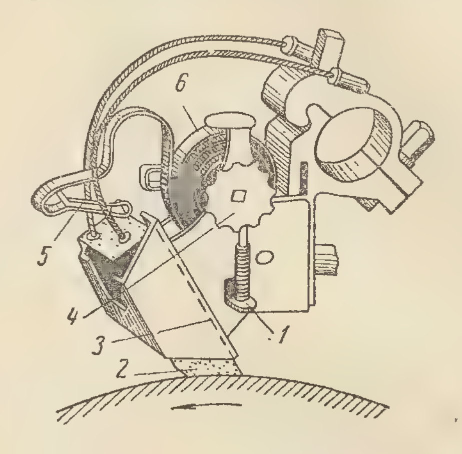


Рис. 9-79. Реактивный щеткодержатель.

Щетка *2* прижимается к стенке *3* пружиной *6* часового типа. Регулировка давления пружины достигается поворотом ее оси, на конце которой закреплен маховичок *4*, запираемый пружинным штифтом *1*. Конец *5* пружины согнут в колечко и играет роль нажимного пальца.

В крупных машинах для получения необходимой контактной поверхности приходится увеличивать толщину щеток. Однако тяжелые щетки вследствие большой инерции не обеспечивают надежного контакта с коллекторными пластинами. В таких машинах применяют сдво-

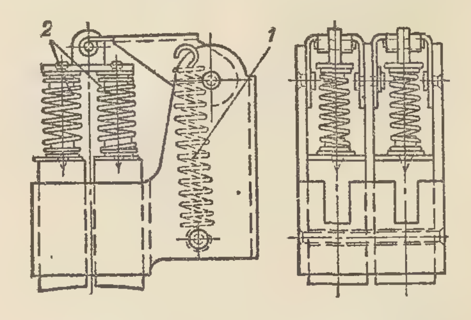


Рис. 9-80. Сдвоенный радиальный щеткодержатель.

енные щеткодержатели. На рис. 9-80 показана конструкция сдвоенного щеткодержателя радиального типа. Каждая щетка сидит в своей обой-

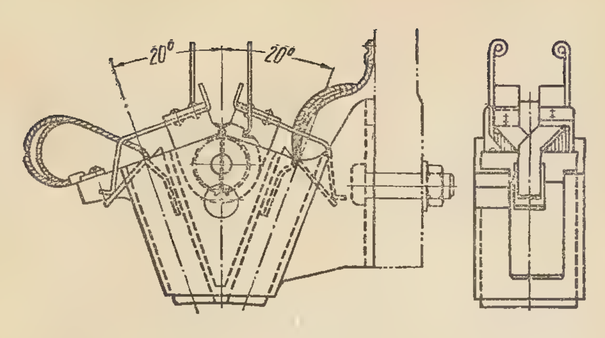


Рис. 9-81. Сдвоенный реактивный щеткодержатель.

ме, благодаря чему обеспечивается независимая работа щеток. Обе щетки прижимаются к коллектору одной пружиной *1*, а равномерность давления достигается шарнирным устройством буферных пружин *2*. На правой проекции показаны два сдвоенных щеткодержателя, объединенных в общий конструктивный блок. Благодаря этому уменьшается расстояние между соседними щетками в направлении образующей коллектора, а следовательно, и длина коллекторной пластины.

На рис. 9-81 представлена конструкция сдвоенного щеткодержателя реактивного типа.

Расчет пружины щеткодержателя. Для расчета пружины надо предварительно наметить конструкцию щеткодержателя и определить длину пружины при новой и изношенной щетке, а также плечи сил P и Q (рис. 9-82).

Давление щетки на коллектор

$$P = pF, \ кГ, \qquad (9\text{-}157)$$

где p — удельное давление щетки на коллектор, $кГ/см^2$, по приложению V;

F — контактная поверхность щетки, $см^2$.

Условие неизменного давления щетки при износе

$$Qh = Pm. \qquad (9\text{-}158)$$

Усилие пружины

$$Q = P\frac{m}{h}, \ кГ. \qquad (9\text{-}159)$$

Удлинение пружины

$$f = \frac{8QD_n^3}{Gd^4}, \qquad (9\text{-}160)$$

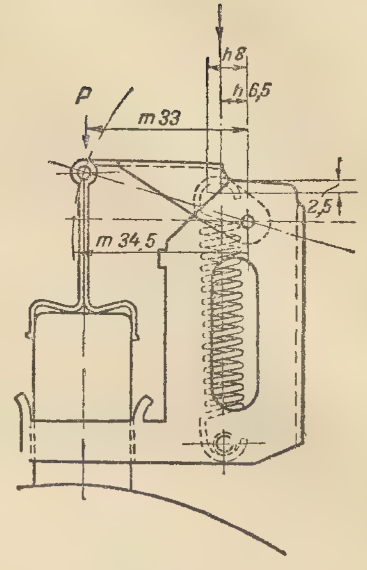


Рис. 9-82. К расчету пружины щеткодержателя.

где D — средний диаметр пружины, *см*;

d — диаметр проволоки, *см*;

G — модуль упругости, равный $8 \cdot 10^5$ $кГ/см^2$;

h — плечо пружины, *см*;

m — плечо рычага, *см*.

Расстояние между ушками пружины в рабочем состоянии

$$H = H_0 + f, \qquad (9\text{-}161)$$

где H_0 — расстояние между ушками пружины в свободном состоянии, *см*;

f — удлинение пружины, *см*.

Число витков пружины

$$n = \frac{Gd^4 f}{8D^3 Q} = 10^5 \frac{d}{c^3} \cdot \frac{f}{Q}, \qquad (9\text{-}162)$$

где

$$c = \frac{D}{d} \approx 5 \div 8.$$

Условие неизменного давления щетки

$$f\frac{h}{m} = f'\frac{h'}{m'} = \text{const}. \qquad (9\text{-}163)$$

При численных выражениях величин, указанных на рис. 9-82

$$1{,}8 \cdot \frac{0{,}65}{3{,}3} = 1{,}55 \cdot \frac{0{,}8}{3{,}45} = 0{,}36.$$

Таким образом, требование неизменности давления щетки на кол-

лектор в этом щеткодержателе выполнено.

9-17. ЩЕТОЧНЫЕ ПАЛЬЦЫ, ТРАВЕРСЫ, БРАКЕТЫ

Щеткодержатели укрепляются на пальцах, представляющих собой металлические стержни круглого или прямоугольного сечения. Щеткодержатели асинхронных и синхронных машин сидят на изолированной части пальца, металлический конец которого запрессован или ввинчен в прилив подшипникового щита. Между щеткодержателями на палец надевают изоляционные шайбы, которые увеличивают путь поверхностного перекрытия изоляции.

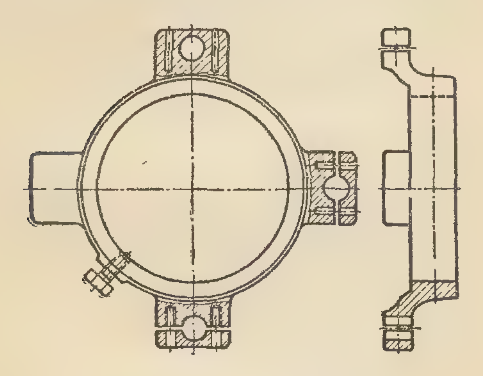


Рис. 9-83. Траверса щеткодержателя.

Щеткодержатели машин постоянного тока укрепляются на неизолированной части щеточного пальца, изолированный конец которого укреплен в приливе специальной детали, носящей название траверсы (рис. 9-83). Назначение траверсы заключается в том, чтобы можно было передвигать щетки по окружности коллектора и совмещать их с положением нейтрали. Хотя современные машины постоянного тока выполняют с добавочными полюсами и положение нейтрали у них постоянное, однако траверсы сохранились, так как они позволяют за счет поворота компенсировать неточности сборки, обработки и разметки якоря под обмотку. Кроме того, наличие траверсы позволяет дифференцировать сборку и собирать весь щеточный аппарат отдельно от машин. В последнее время притирка щеток производится не в машине, а в специальном приспособлении на барабане, обтянутом стеклянной бумагой. В это приспособление вставляют траверсу с установленными щеткодержателями со щетками. На рис. 9-83 приливы траверсы изображены на различных стадиях ее механической обработки.

Конец щеточного пальца изолируют слоистой изоляцией, состоящей из бакелизированной бумаги с добавлением слюды, или опрессовывают пластмассой.

Расстояние между центрами отверстий траверсы и направления осей отверстий в них должны быть точно выдержаны, так как этим определяются равномерное расположение щеток по окружности коллектора и параллельность щеточных пальцев.

Машины малой мощности в целях сокращения габаритов изготовляются без поворотной траверсы, и щеткодержатели укрепляются в станине или подшипниковом щите. Если машина не имеет дополнительных полюсов, то при обмотке концы проводников смещают по окружности коллектора на величину сдвига нейтрали, определяемую расчетным путем и проверяемую при испытании пробных образцов машины. Следует отметить, что сдвиг проводников обмотки по коллектору должен быть сделан в противоположную сторону по сравнению со сдвигом щеток. Так, например, если в генераторах щетки сдвигают по направлению вращения, то концы обмотки должны быть сдвинуты против направления вращения, а в электродвигателях, где щетки сдвигают против направления вращения, концы обмотки должны быть сдвинуты по направлению вращения.

В машинах малой и средней мощности траверсы надевают на специальную заточку переднего подшипникового щита и застопоривают стопорным винтом. Положение траверсы устанавливается при испытании машины и отмечается чертой, проведенной через торец траверсы и головку подшипникового щита. Таким образом, при сборке машины в процессе эксплуатации положение

траверсы определяется по совпадению черт на обеих деталях.

В машинах на стояковых подшипниках траверса укрепляется на торце станины. При большой длине коллектора к траверсе прикрепляют массивные кронштейны (бракеты), на которых закрепляют щеткодержатели (см. рис. 9-3).

При большом токе, приходящемся на щеточный палец, необходимо, чтобы омические сопротивления пальца и коллекторной пластины были примерно равны. Разность сопротивлений вызывает неравномерность токовой нагрузки различных щеток. Поэтому стальные щеточные пальцы шунтируют медными шинами, имеющими хороший контакт со всеми щеткодержателями, сидящими на пальце. При испытании крупных машин следует проверить падение напряжения между щеткодержателями одного щеточного пальца.

Соединение между щеточными пальцами одинаковой полярности, а также с полюсными катушками и зажимами при токе до 200 *а* производят проводами, свитыми из тонких проволок, в резиновой изоляции с защитной оплеткой.

При больших токах соединения осуществляют медными шинами.

9-18. МУФТЫ, ШКИВЫ, САЛАЗКИ, ФУНДАМЕНТНЫЕ ПЛИТЫ

Соединение электрических машин с рабочими механизмами, первичными двигателями и между собой производится при помощи муфт или ременных передач. Зубчатые передачи с насадкой шестерни непосредственно на конец вала электрической машины применяются относительно редко.

Чаще всего применяют муфты полуэластичного типа (табл. XI-2) с кулачками из кожаных шайб или резиновых втулок. Такие муфты допускают небольшой перекос валов при монтаже и смягчают удары при резких пусках и торможениях. Полумуфты насаживают на концы валов с напряженной посадкой второго класса точности. Для предохранения от проворачивания муфт служат шпонки.

Ременные передачи применяются двух видов: с плоским ремнем (табл. XI-3) и с клиновым ремнем (табл. XI-4). Преимущество клиноременной передачи заключается в том, что она создает меньшее поперечное усилие на конец вала, надежнее в работе и занимает меньше места. При обрыве одного из ремней передача продолжает работать. При помощи клиноременной передачи электродвигатели малых мощностей соединяют с приводными механизмами. В новых сериях синхронных машин средней мощности клиноременные передачи применяют для соединения возбудителей с валом генератора как при горизонтальной, так и при вертикальной их установке. Это дает возможность применять быстроходные возбудители серийного производства для относительно тихоходных синхронных генераторов.

Во всякой ременной передаче необходимо регулировать натяжение ремней по мере их вытягивания. Это особенно относится к ремням из прорезиненных тканей. Для натяжения ремней служат салазки, которые представляют собой балки коробчатого сечения с прорезью в верхней части. Салазки крепятся к фундаменту, а в углубления салазок вводят головки болтов, прикрепляющих лапы двигателя. Путем передвижения двигателя на салазках можно регулировать натяжение ремня в широких пределах.

Крупные электрические машины устанавливают на фундаментных плитах, которые заливают в бетонный фундамент и крепят к нему болтами, помещенными в глубоких колодцах. Назначение фундаментных плит состоит в следующем:

а) создание ровной базовой поверхности;

б) возможность жесткого крепления узлов машины и фиксирования их расположения при помощи штифтов;

в) равномерная передача статических и динамических нагрузок на фундамент.

Фундаментные плиты разделяются на целые и отдельные. Преимущество целых плит заключается

в облегчении условий монтажа. Но возможность их применения ограничивается транспортными, подъемными и экономическими соображениями.

Фундаментные плиты ранее отливались из чугуна и имели очень большой вес. В настоящее время фундаментные плиты выполняются исключительно сварными. За счет применения специальных форм проката и гнутых балок достигается большая экономия веса без уменьшения жесткости (см. рис. 9-16).

При проектировании фундаментных плит учитываются статические и динамические нагрузки, действующие на фундамент. Статическая нагрузка составляется из веса машины и одностороннего магнитного притяжения.

Динамическая нагрузка синхронных машин определяется величиной ударного тока короткого замыкания, вращающий момент от которого подсчитывается по формуле

$$M_{к.з} = 973 \frac{1,05^2 P_н}{n x'_d}, \ кГ \cdot м, \qquad (9\text{-}164)$$

где $P_н$ — номинальная мощность, *ква*; n — скорость вращения, *об/мин*.

При наличии демпферной обмотки вместо x'_d следует подставлять значение x''_d.

Обычно для синхронных машин

$$M_{к.з} = (5 \div 8)\, M_н. \qquad (9\text{-}165)$$

для асинхронных машин

$$M_{к.з} = (3 \div 6)\, M_н; \qquad (9\text{-}166)$$

для машин постоянного тока

$$M_{к.з} = 10 M_н. \qquad (9\text{-}167)$$

Величина площади соприкосновения фундаментной плиты с фундаментом должна определяться из условия, чтобы удельная нагрузка на фундамент не превышала 8—10 *кГ/см²*.

Жесткость плиты должна удовлетворять следующим условиям:

а) Деформация плиты при затягивании фундаментных болтов не должна давать практически заметного искажения центровки валов и воздушного зазора машины.

б) Плита с собранной на ней машиной или агрегатом в условиях наиболее неблагоприятного подъема краном с учетом коэффициента динамичности, равного 2, не должна давать остаточных деформаций.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

10-1. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Возникающие при работе электрической машины потери переходят в тепло, которое необходимо непрерывно отводить. Существует ряд способов отвода тепла, т. е. охлаждения машины.

До настоящего времени охлаждение подавляющего большинства электрических машин осуществляется обдуванием воздухом их нагреваемых частей.

В крупных турбогенераторах и синхронных компенсаторах в качестве охлаждающего агента применяется водород, а для первых также вода и масло.

В последние годы для работы в особых условиях (например, при высокой температуре окружающей среды) разработаны конструкции электрических машин с водяным охлаждением при небольшой их мощности.

Отвод тепла путем обдува машины охлаждающим газом называется вентиляцией.

Вентиляция электрических машин может быть **естественной** без применения особых охлаждающих устройств, как-то: вентиляторов и т. п., и **искусственной** с применением таких устройств.

Естественное охлаждение применяется, как правило, только в машинах малой мощности (<1 *квт*) и открытых машинах с относительно невысоким использованием активных материалов.

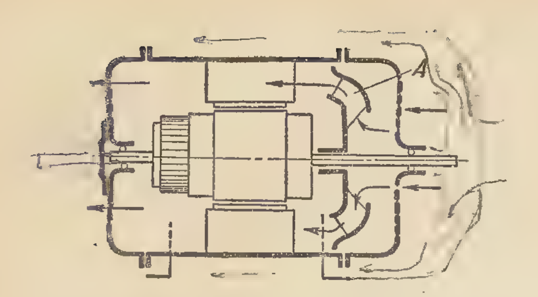


Рис. 10-1а. Аксиальная нагнетательная система самовентиляции машины постоянного тока.

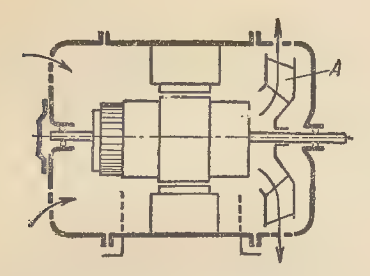
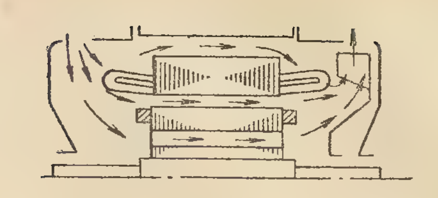


Рис. 10-1б. Аксиальная вытяжная система самовентиляции машины постоянного тока.



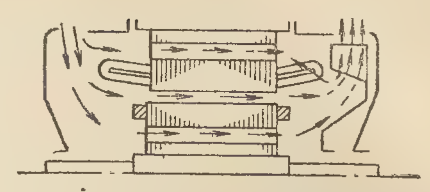


Рис. 10-1в. Аксиальная вытяжная система самовентиляции асинхронной машины.

Это объясняется тем, что с ростом мощности и размеров машины значительно быстрее возрастает удельная тепловая нагрузка на охлаждающую поверхность (см. § 1-2). В результате увеличивается нагрев машины, что приводит к необходимости интенсивного, т. е. искусственного, ее охлаждения.

Машины с искусственной вентиляцией разделяются на: 1) машины с самовентиляцией и 2) машины с независимой вентиляцией. Первые снабжаются для охлаждения нагреваемых частей встроенным вентилятором или вентиляционными лопатками, помещенными на роторе машины.

Самовентилируемые машины могут иметь систему внутренней вентиляции, при которой активные части непосредственно вентилируются потоком воздуха или газа, нагнетаемого вентилятором, и систему наружной вентиляции, при которой вентилятор обдувает наружную поверхность корпуса машины, а ее активные части закрыты для доступа внешнего воздуха.

В машинах с независимой вентиляцией охлаждающая среда (газообразная или жидкая) подается в машину специальным устройством (вентилятором или насосом), имеющим отдельный двигатель.

В зависимости от характера работы встроенного вентилятора различают вентиляцию «нагнетательную» (рис. 10-1а) и «вытяжную» (рис. 10-1б и 10-1в). Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что в машину попадает холодный воздух без предварительного его подогрева при прохождении через вентилятор за счет потерь в последнем. Следует иметь в виду, что даже незначительный подогрев воздуха из-за потерь в вентиляторе (3—7° С) заставляет прогонять через машину большее (на 15—20%) количество воздуха, что повышает потери на вентиляцию.

В зависимости от направления охлаждающих потоков воздуха или газа внутри машины различают вентиляцию *радиальную* (рис. 10-2) и *аксиальную* (рис. 10-1).

При радиальной вентиляции охлаждающие потоки движутся радиально относительно оси вала машины по вентиляционным каналам, образованным в шихтованных сердечниках статора и ротора путем разделения общей длины активной стали на отдельные пакеты по 40—80 *мм* шириной. Между пакетами оставляют промежутки по 10—20 *мм*, которые и выполняют роль радиальных вентиляционных каналов. В нормальных машинах шири-

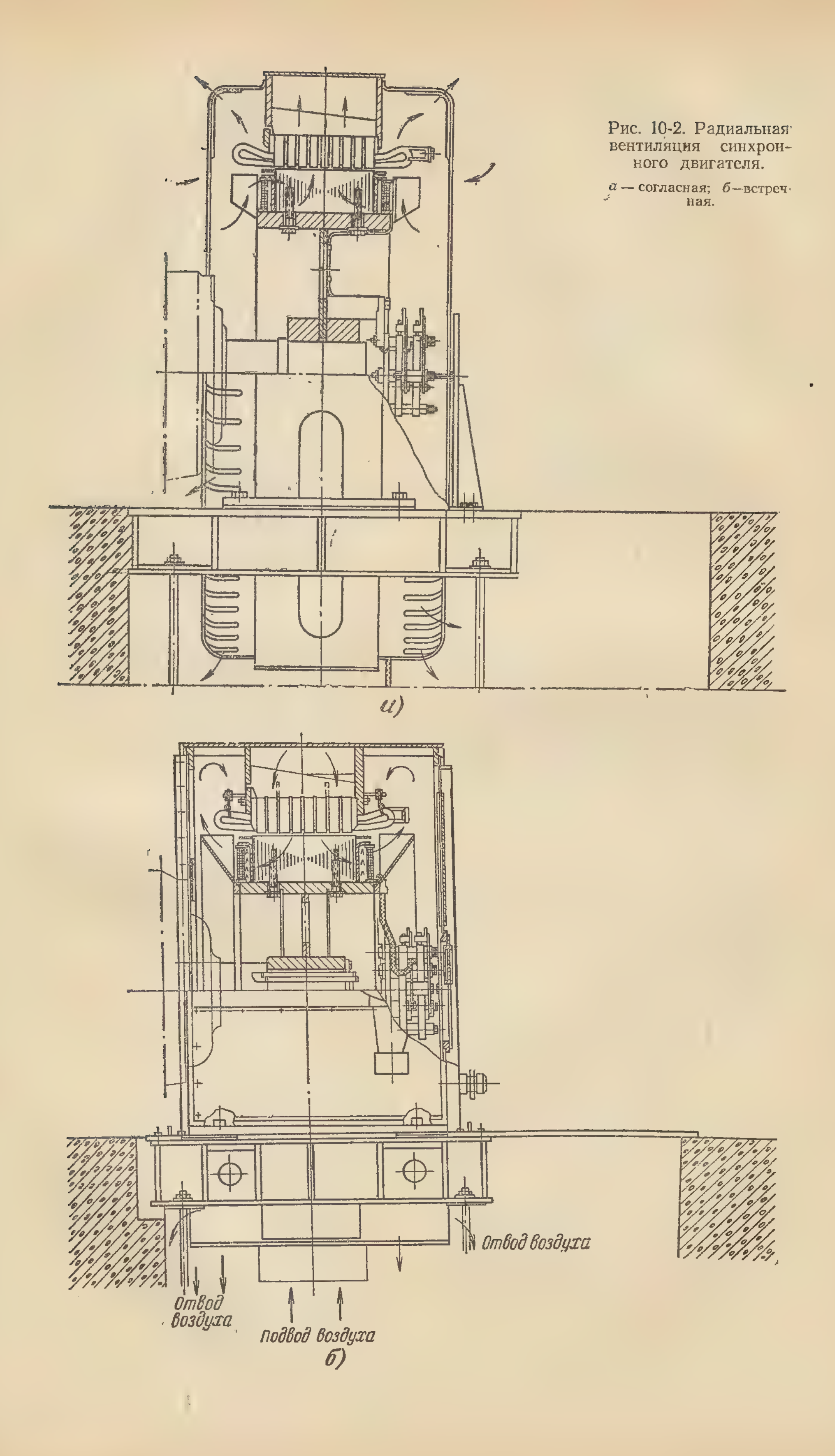


Рис. 10-2. Радиальная вентиляция синхронного двигателя.

а — согласная; *б* — встречная.

на радиального канала принимается равной 10 *мм*.

Конструктивно радиальные каналы образуются размещением



Рис. 10-3. Компенсатор напора при встречно-радиальной системе вентиляции.

между пакетами особых дистанционных распорок, которые приклепываются или привариваются к крайним утолщенным листам пакетов статора и ротора. При вращении ротора его распорки — ветреницы выполняют также фунции вентиляционных лопаток, прогоняющих воздух или газ в радиальных каналах. В машинах с малым воздушным зазором, например в асинхронных двигателях, следует тщательно производить сборку и насадку пакетов ротора и статора, чтобы роторные и статорные радиальные каналы точно пришлись друг против друга.

На рис. 10-2, *а* и *б* показана радиальная система вентиляции синхронных двигателей. В первой, называемой согласно-радиальной системой, охлаждающий поток движется от центра к периферии статора; во второй, называемой встречно-радиальной системой, поток движется в обратном направлении. Для встречного движения охлаждающего потока применяется принудительный подвод воздуха в машину от независимого вентилятора. Для уравнивания центробежного вентиляционного эффекта полюсов ротора при встречной системе применяются компенсаторы напора (рис. 10-3), располагаемые по торцам роторной втулки. В качестве встроенных вентиляционных элементов в согласно-радиальных системах вентиляции используют центробежные и осевые вентиляторы (см. рис. 10-2, *а* и 10-7).

Встречно-радиальная система вентиляции дает благодаря принудительному нагнетанию воздуха от постороннего вентилятора более равномерное распределение воздушного потока по радиальным каналам, а следовательно, более равномерное охлаждение машины.

При аксиальной вентиляции охлаждающий поток движется параллельно оси вала машины (см. рис. 10-1). В шихтованных сердечниках статора и ротора делают аксиальные вентиляционные каналы, показанные на рис. 10-4.

В асинхронных двигателях небольшой мощности прогоняют охлаждающий воздух между внешней поверхностью сердечника статора и корпусом машины (рис. 10-1, *в*).

Аксиальная система вентиляции конструктивно проще радиальной,

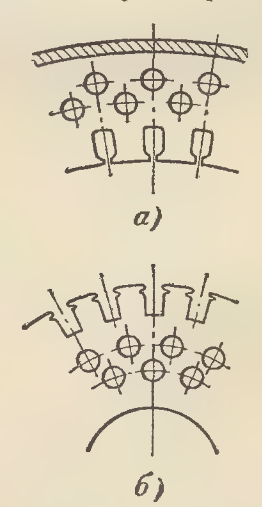


Рис. 10-4. Расположение аксиальных каналов.

а — в статоре; *б* — в роторе.

требующей пакетировки сердечников статора и ротора. Однако при большой длине последних может возникнуть значительная неравно-

Таблица 10-1

Приближенные значения максимального отношения длины сердечника якоря к диаметру якоря при аксиальной вентиляции машин постоянного тока

D, мм	200	300	500	600	740	850
l/D	1,2—1	0,8	0,65	0,6—0,5	0,5	0,5

мерность нагрева машины вдоль оси.

На основании данных практики [Л. 88] считают, что аксиальная вентиляция может применяться при отношении длины сердечника ротора к диаметру ротора не более 1,2. В табл. 10-1 указаны примерные значения этого отношения в зависимости от диаметра.

В машинах постоянного тока с диаметром ротора до 200—250 *мм* применяют, как правило, аксиальную вентиляцию, так как при таких малых диаметрах выполнить конструктивно радиальную вентиляцию трудно. Кроме того, эффективность радиальной вентиляции в этом случае не выше эффективности аксиальной вентиляции.

Но при радиальной вентиляции для машин со скоростями вращения выше 600—750 *об/мин* можно обойтись без вентилятора на валу, что исключается при аксиальной. Последний вид самовентиляции требует собственного вентилятора на валу. Принудительное движение охлаждающего воздуха около лобовых частей обмоток статора может осуществляться вентилирующим действием крылышек, пристроенных к концам стержней обмотки ротора асинхронной машины или якоря машины постоянного тока.

В асинхронных короткозамкнутых двигателях с литой алюминиевой беличьей клеткой вентиляционные лопатки составляют одно целое (см. § 9-5) с короткозамыкающими торцевыми кольцами клетки. Так как развиваемое такими лопатками давление воздуха невелико, стремятся по возможности уменьшить входное сопротивление для воздуха, поступающего в машину.

В синхронных машинах с явно выраженными полюсами сильное вентилирующее действие создают полюсы ротора; при согласно-радиальной системе вентиляции машины с отношением $l:\tau=1,5\div2$ выполняются даже без особых вентиляторов. В более длинных машинах ставят отдельные вентиляторы или пристраивают к торцам ротора ковшевидные лопатки (см. рис. 10-2). В быстроходных синхронных машинах применяют центробежные и осевые вентиляторы (пропеллерного типа). Последние подают охлаждающий газ в аксиальном направлении.

Машины с наружной самовентиляцией или обдуваемые являются закрытыми, предназначенными для работы в помещениях с парами, разъедающими изоляцию обмоток, запыленным воздухом, взрывоопасными газами, для работы на открытом воздухе и т. п.

Наружный вентилятор устанавливается на выступающем конце вала машины (рис. 10-5). Так как наружная поверхность станины закрытой машины является основной теплорассеивающей поверхностью, то для повышения эффективности теплорассеяния эту поверхность выполняют ребристой или же прогоняют воздух через особые аксиальные трубки, расположенные внутри станины. Для усиления теплопередачи от внутренних частей закрытой машины к наружной ее поверхности иногда устраивают внутри машины циркуляцию воздуха посредством особого вентилятора. Применение внешнего обдува в закрытых машинах позволило значительно увеличить их мощность. Обдуваемые машины могут давать до 60—80% номинальной мощности и более машин тех же габаритов с внутренней самовентиляцией (продуваемых) или открытого исполнения.

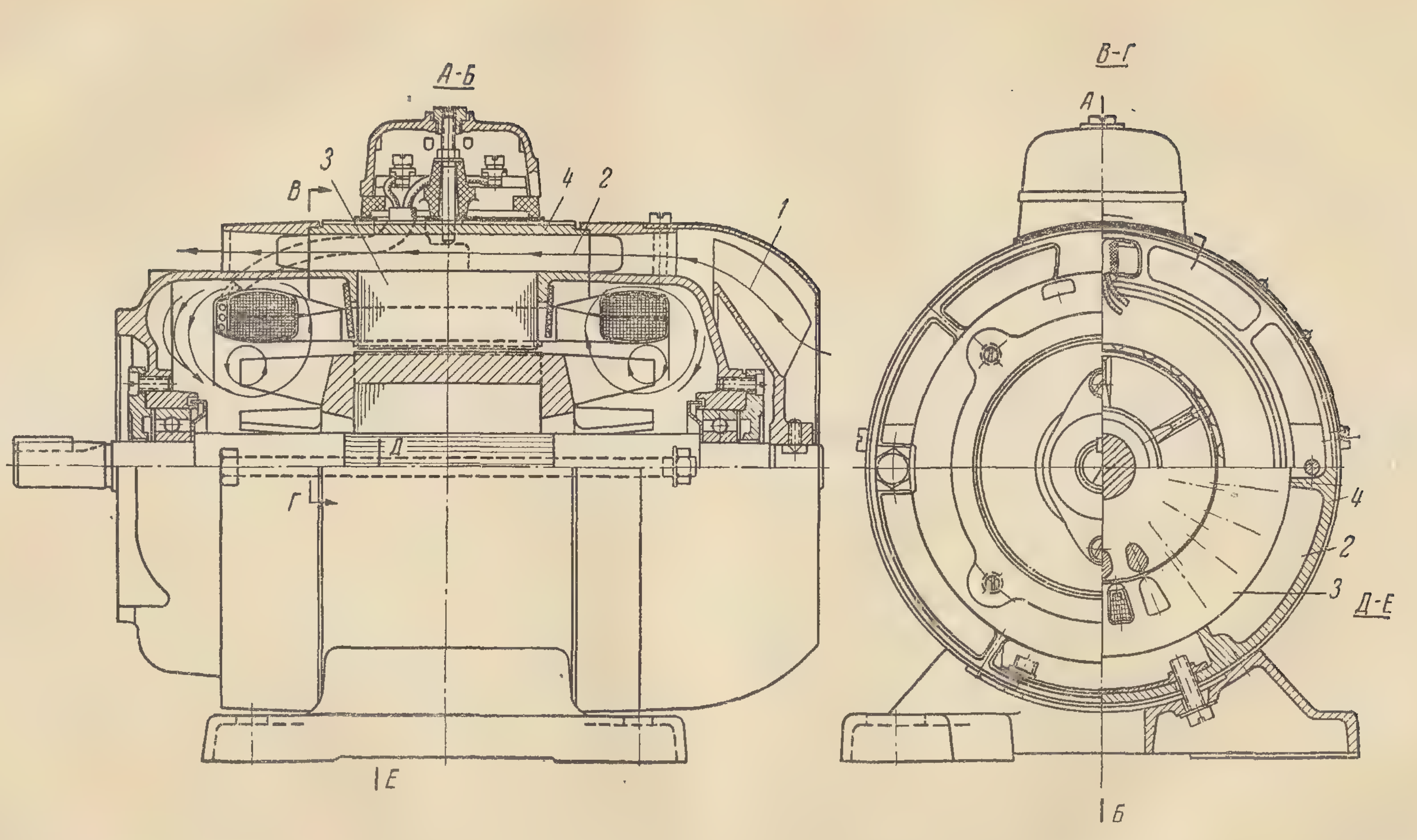


Рис. 10-5. Закрытый асинхронный двигатель обдуваемого исполнения.

На рис. 10-5 показаны продольный и поперечный разрезы закрытого обдуваемого трехфазного асинхронного двигателя серии АОЛ-21 мощностью 0,4 *квт* при 2 800 *об/мин*. Наружный вентилятор *1* засасывает охлаждающий воздух, направляя его в каналы *2*, образованные внешней цилиндрической поверхностью сердечника статора *3* и внутренней поверхностью литой алюминиевой оболочки *4* корпуса машины.

Независимая вентиляция характеризуется наличием внешнего вентилятора, скорость которого не зависит от скорости вращения охлаждаемой машины. Она применяется в машинах с низкой скоростью вращения или широким диапазоном регулирования скорости вращения; в асинхронных и синхронных машинах независимая вентиляция находит применение наряду с самовентиляцией при недостаточной производительности последней. Независимая вентиляция может быть выполнена по разомкнутому или замкнутому циклу движения охлаждающего потока. При разомкнутом цикле вентиляции охлаждающий воздух подается в машину внешним вентилятором, например, из машинного зала, проходит, как правило, через воздухоохладитель и выбрасывается в машинный зал нагретым (рис. 10-6, *а*).

При замкнутом цикле движения охлаждающего воздуха (или газа) он циркулирует в замкнутом воздуховоде (рис. 10-6, *б*). В воздуховоде перед машиной установлен воздухоохладитель, в котором происходит теплообмен между нагретым воздухом и охлаждающей холодной водой. При этом обычно перед вентилятором создается давление воздуха, равное атмосферному («точка атмосферы»); тогда во всех других частях воздуховода давление воздуха будет выше атмосферного, что исключит подсос воздуха через неплотности из помещения, а вместе с тем пыли и паров масла. Вследствие неизбежной утечки воздуха его пополнение производится через фильтр, установленный в месте, соответствующем «точке атмосферы».

Замкнутый цикл движения охлаждающего газа может быть и при системе самовентиляции. Такая система охлаждения является общепринятой для турбо- и гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. На рис. 10-7 показана подобная система вентиляции синхронного компенсатора с водородным охлаждением.

Охлаждающий газ нагнетается с торцов ротора за счет действия осевых вентиляторов *1* и частично вентилирующего действия полюсов *2* ротора. Проходя через радиальные вентиляционные каналы *3*, нагретый газ поступает в газоохладители *4* и после охлаждения в последних вновь засасывается осевыми вентиляторами *1*.

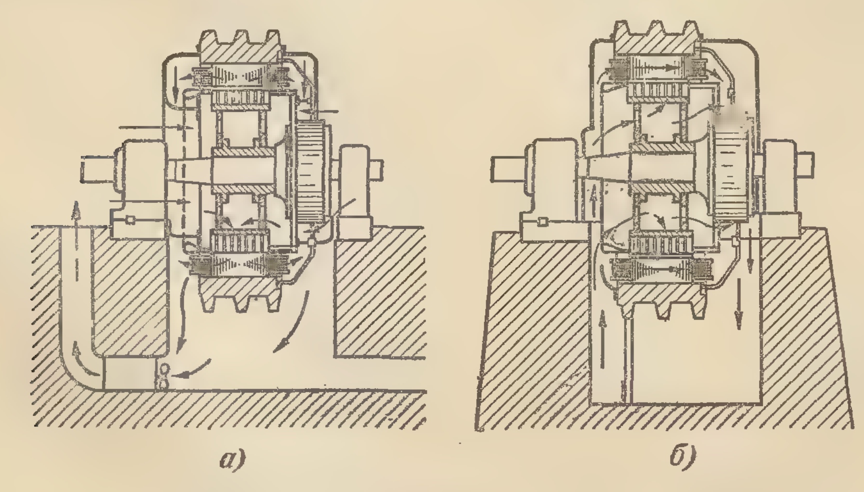


Рис. 10-6. Независимая вентиляция машины постоянного тока.
а — по разомкнутому циклу; *б* — по замкнутому циклу.

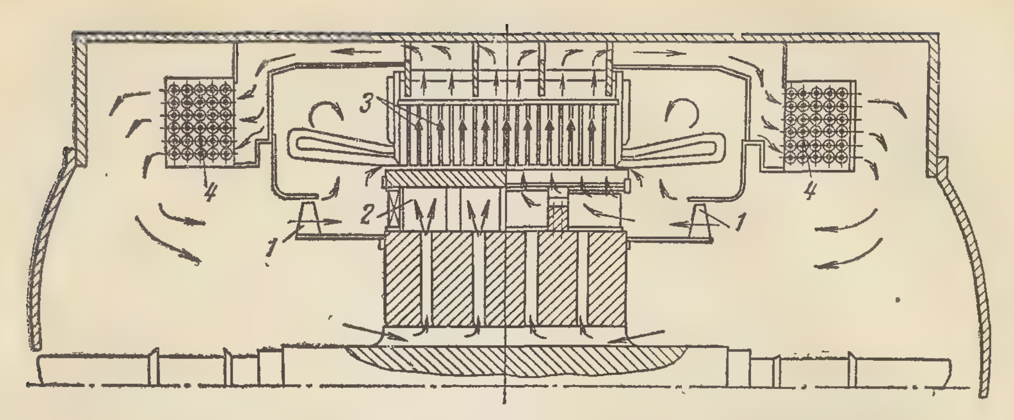


Рис. 10-7. Схема радиальной самовентиляции по замкнутому циклу синхронного компенсатора.

В последние годы в мощных турбогенераторах (150 *Мвт* и более) нашло широкое применение непосредственное (внутреннее) охлаждение проводников обмоток статора и ротора. При этом способе охлаждения охлаждающая среда (водород или вода) проходит по каналам, выполненным внутри проводников (см. гл. 14).

Для сверхмощных турбогенераторов (500 *Мвт* и более) разработана конструкция непосредственного водяного охлаждения проводников не только обмотки статора, но и ротора.

В Советском Союзе водяное охлаждение применяется также для обмоток статора крупных гидрогенераторов (например, красноярский гидрогенератор на 500 *Мвт*).

10-2. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

При вентиляционном расчете машины должны быть решены следующие задачи:

1) определение количества воздуха, которое необходимо ежесекундно прогонять через машину, V *м³/сек*;

2) определение давления (напора) H *кГ/м²* (или *мм вод. ст.*), обеспечивающего прохождение требуемого количества воздуха.

Количество охлаждающего воздуха, подводимого к машине, не должно быть малым во избежание перегрева обмоток, но и не должно быть чрезмерным, так как иначе будут расти потери на вентиляцию и снизится к. п. д. машины. Воздушный поток обычно отводит все тепло, обусловленное потерями в машине, за исключением тепла, выделяющегося в подшипниках. Последнее отводится или естественным теплорассеянием наружной поверхности подшипников, или маслом при циркуляционной смазке подшипников.

Необходимое количество охлаждающего воздуха рассчитывается по формуле

$$V_{\text{в}} = \frac{\Sigma P_{\text{в}}}{c_{\text{в}} \Theta_{\text{в}}}, \ м^3/сек, \qquad (10\text{-}1)$$

где $\Sigma P_{\text{в}}$ — потери, отводимые воздухом, *вт*;

$c_{\text{в}} = 1100$ *дж/град·м³* — теплоемкость воздуха;

$\vartheta_{\text{г}} - \vartheta_{\text{х}} = \theta_{\text{в}}$ — подогрев воздуха, °С;

$\vartheta_{\text{г}}$ — температура горячего воздуха при выходе его из машины, °С;

$\vartheta_{\text{х}}$ — температура холодного воздуха при входе его в машину, °С.

Значение подогрева воздуха $\Theta_{\text{в}}$ для машин с изоляцией классов А, Е и В может быть взято равным примерно 20° С, а с изоляцией классов F и Н до 30° С, для турбо- и гидрогенераторов 25° С.

Ориентировочно значение подогрева воздуха колеблется в пределах от трети до четверти допустимого перегрева обмоток.

Согласно ГОСТ 183-66 допустимые перегревы или превышения температуры обмоток установлены *по отношению к условной температуре* охлаждающего воздуха $+40°$ С.

Вторая задача расчета вентиляции электрической машины, как указывалось, заключается в определении напора или давления H, которое должно быть создано вентиляционным устройством (вентилятором), чтобы обеспечить прохождение через машину необходимого количества воздуха V.

Опыт показывает, что для вентиляционной системы электрических машин можно принять с достаточной для практики точностью следующую зависимость между H и V:

$$H = ZV^2, \qquad (10\text{-}2)$$

где Z — постоянная.

Величина Z, как это будет показано ниже, зависит только от геометрических форм и размеров воздухопровода вентиляционной системы.

Уравнение (10-2) определяет характеристику воздухопровода. Из него следует, что *характеристика воздухопровода* электрической машины $H=f(V)$ представляет собой квадратичную параболу.

Для определения необходимого давления H требуется рассчитать постоянную Z, которую в дальнейшем будем называть *аэродинамическим сопротивлением воздухопровода* электрической машины.

$$Z = \frac{H}{V^2}. \qquad (10\text{-}3)$$

Давление H равно сумме потерь давления на всех участках воздухопровода, следующих один за другим по движению потока воздуха, плюс скоростное или динамическое давление H_d движущегося воздуха, обладающего при выходе в атмосферу запасом кинетической энергии.

Динамическое давление H_d согласно теории гидродинамики равно:

$$H_d = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{v^2}{2} =$$

$$= \xi_d v^2,\ кГ/м^2\ (мм\ вод.\ ст.), \qquad (10\text{-}4)$$

где $\gamma \approx 1{,}2\ кГ/м^3$ — удельный вес воздуха;
$g = 9{,}81\ м/сек^2$;
v — скорость движущегося воздуха, $м/сек$;
ξ_d — коэффициент динамического давления.

При нормальном объемном весе воды давление 1 $кГ/м^2$ соответствует весу 1 *мм вод. ст.* на площади 1 $м^2$.

Очевидно, коэффициент ξ_d динамического давления равен:

$$\xi_d = \frac{\gamma}{2g} \approx \frac{1{,}2}{2 \cdot 9{,}81} =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3},\ кГ \cdot сек^2 \cdot м^{-4}. \qquad (10\text{-}5)$$

Давление H_i, расходуемое вентилятором на покрытие аэродинамических потерь в остальных участках воздухопровода, на основании теории гидродинамики также пропорционально квадрату скорости воздуха v_i на соответствующем участке:

$$H_i = \xi_i v_i^2, \qquad (10\text{-}6)$$

где ξ_i — коэффициент аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка воздухопровода;
v_i — скорость воздуха в рассматриваемом участке.

Полное давление на весь воздухопровод, включая потерю скоростного, или динамического, давления при выходе воздуха из машины, составит:

$$H = \sum H_i + H_d =$$

$$= \sum \left(\xi_i v_i^2 \right) + \xi_d v_{вых}^2. \qquad (10\text{-}7)$$

На основании (10-3) и (10-7) аэродинамическое сопротивление воздухопровода, состоящего из последовательно включенных отдельных участков, определится следующим образом:

$$Z_i = \sum \left(\xi_i \frac{v_i^2}{V^2} \right) + \xi_d \frac{v_{вых}^2}{V^2} =$$

$$= \sum \left(\frac{\xi_i}{S_i^2} \right) + \frac{\xi_d}{S^2_{\text{вых}}} =$$

$$= \sum Z_i + Z_{\text{вых}}, \qquad (10\text{-}8)$$

так как

$$V = V_i = v_i S_i = v_{\text{вых}} S_{\text{вых}}, \qquad (10\text{-}9)$$

где Z_i — аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка воздухопровода:

$$Z_i = \xi_i / S_i^2. \qquad (10\text{-}10)$$

Здесь: S_i — поперечное сечение рассматриваемого участка, *м*²;

$v_{\text{вых}}$ — скорость выходящего из машины воздуха, *м/сек*;

$S_{\text{вых}}$ — поперечное сечение в месте выхода воздуха, *м*².

Из (10-10) следует, что аэродинамическое сопротивление является функцией геометрической формы участков воздухопровода. Значения коэффициента ξ_i аэродинамического сопротивления для отдельных участков воздухопровода точно определить трудно ввиду сложной конфигурации воздухопровода электрической машины. Приходится использовать значения ξ_i, найденные опытным путем для простейших форм воздухопровода. Вентиляционный расчет на базе этих коэффициентов хотя и является приближенным, но он дает возможность оценить требования, предъявляемые к вентилятору, и позволяет установить «узкие» места воздухопровода, чрезмерно тормозящие движение воздуха.

а) **Коэффициенты аэродинамических сопротивлений.** При входе воздуха в машину имеет место потеря давления. В зависимости от формы края входного круглого отверстия коэффициенты сопротивления, найденные опытным путем, равны:

для выступающих или острых краев (рис. 10-8, *а*)

$$\xi_{\text{вх}} = 61 \cdot 10^{-3}; \qquad (10\text{-}11)$$

для прямоугольных краев (рис. 10-8, *б*)

$$\xi_{\text{вх}} = 30 \cdot 10^{-3}; \qquad (10\text{-}12)$$

для закругленных краев (рис. 10-8, *в*)

$$\xi_{\text{вх}} = 12{,}5 \cdot 10^{-3}, \qquad (10\text{-}13)$$

если радиус r закругления входного отверстия канала принят 0,1 d.

Здесь d — диаметр отверстия.

В случае, когда r по величине приближается к d, значение $\xi_{\text{вх}}$ стремится к нулю.

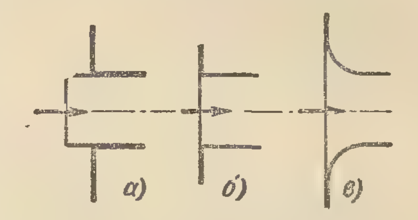


Рис. 10-8. Формы входных отверстий воздухопровода.

Значение $\xi_{\text{вх}}$ по (10-13) можно также принять при проходе воздуха через проволочную сетку.

Потеря давления при входе воздуха в отверстие канала составит:

$$H_{\text{вх}} = \xi_{\text{вх}} v^2_{\text{вх}}, \ кГ/м^2 \ (мм\ вод.\ ст.), \qquad (10\text{-}14)$$

где $v_{\text{вх}}$ — скорость воздуха во входном отверстии, *м/сек*.

Всякие изменения в сечении воздухопровода вызывают потери давления. Чем больше изменяется сечение канала, тем больше потери давления.

Коэффициент аэродинамического сопротивления при внезапном расширении канала $\xi_{\text{расш}}$ определяется по формуле

$$\xi_{\text{расш}} = \xi_d \left(1 - \frac{S_{\text{мин}}}{S_{\text{макс}}}\right)^2 =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{S_{\text{мин}}}{S_{\text{макс}}}\right)^2 \qquad (10\text{-}15)$$

При внезапном сужении канала значение коэффициента аэродинамического сужения $\xi_{\text{суж}}$ можно взять по кривой $\xi_{\text{суж}} = f(S_{\text{мин}}/S_{\text{макс}})$ на рис. 10-9.

Приближенно значение $\xi_{суж}$ равно (с точностью до 10% значений по кривой на рис. 10-9):

$$\xi_{суж} = 35 \cdot 10^{-3}\left(1 - \frac{S_{мин}}{S_{макс}}\right). \quad (10\text{-}16)$$

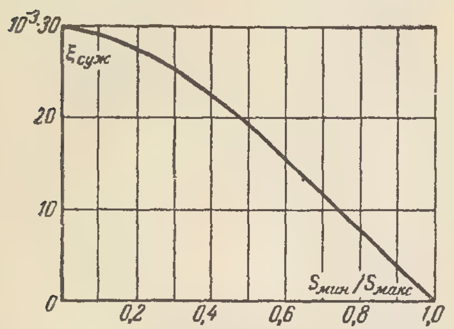


Рис. 10-9. Коэффициент аэродинамического сопротивления сужения.

В уравнениях (10-15) и (10-16) приняты обозначения:

$S_{мин}$ — меньшее сечение канала в месте его изменения;

$S_{макс}$ — большее сечение канала в месте его изменения.

Оба сечения должны быть взяты в одинаковых единицах измерения.

Потеря давления при внезапном изменении сечения канала составит:

при расширении сечения

$$H_{расш} = \xi_{расш} v^2, \ кГ/м^2 \ (мм \ вод. \ ст.); \quad (10\text{-}17)$$

при сужении сечения

$$H_{суж} = \xi_{суж} v^2, \ кГ/м^2 \ (мм \ вод. \ ст.), \quad (10\text{-}18)$$

где v — скорость воздуха в меньшем сечении канала (т. е. бо̀льшая скорость), *м/сек*.

Потери давления возникают, если канал постоянного сечения имеет поворот с острыми кромками (угол α) (рис. 10-10). Значение коэффициента аэродинамического сопротивления ξ_d для этого случая можно взять по кривой на рис. 10-10, где он приведен в зависимости от угла α поворота канала. Потеря давления при повороте составит:

$$H_{\alpha} = \xi_{\alpha} v^2, \ кГ/м^2 \ (мм \ вод. \ ст.), \quad (10\text{-}19)$$

где v — скорость воздуха в канале, *м/сек*.

При узких и относительно длинных каналах воздухопровода приходится учитывать потерю давления от трения движущегося воздуха о стенки канала.

Для круглых каналов значение коэффициента аэродинамического сопротивления от трения воздуха можно рассчитать по формуле

$$\xi_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma}{2g} = \lambda \frac{l}{d} \xi_d = $$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \lambda \frac{l}{d}, \quad (10\text{-}20)$$

где λ — коэффициент трения о стенки канала;

l — длина и d — диаметр канала: оба размера должны быть взяты в одинаковых единицах измерения.

Для расчета трения в аксиальных каналах электрических машин с достаточной для целей практики точностью принимают

$$\lambda \approx 0{,}08. \quad (10\text{-}21)$$

В этом случае расчетная формула для коэффициента $\xi_{тр}$ принимает следующий вид:

$$\xi_{тр} = 5 \frac{l}{d} \cdot 10^{-3}, \quad (10\text{-}22)$$

где l и d взяты в одинаковых единицах измерения (см. также рис. 10-24).

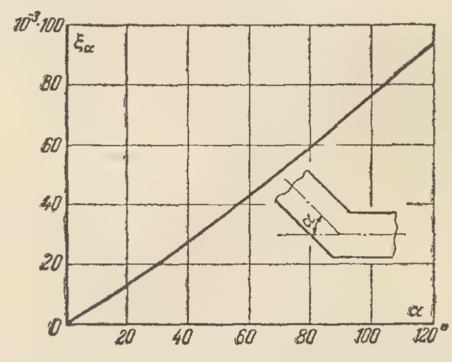


Рис. 10-10. Коэффициент аэродинамического сопротивления изгиба вентиляционного канала.

Если канал имеет прямоугольное сечение, то вместо d следует ввести эквивалентный диаметр

$$d_э = \frac{2ab}{a+b}, \quad (10\text{-}23)$$

где a и b — размеры сторон прямоугольного сечения канала.

Если $a \gg b$, то принимают $d_э = b$. Для каналов произвольного сечения эквивалентным диаметром можно считать диаметр круга, приблизительно равного по площади рассматриваемому сечению.

$Z_{вх}$ $Z_{расш}$ $Z_{суж}$ Z_{α} $Z_{тр}$ Z_d

Рис. 10-11. Схема замещения последовательно включенных участков воздухопровода.

Потеря давления от трения движущегося воздуха в длинном канале составит:

$$H_{тр} = \xi_{тр} v^2, \; кГ/м^2 \; (мм \; вод. \; ст.), \quad (10\text{-}24)$$

где v — скорость воздуха в канале, *м/сек*.

б) **Разветвленные воздухопроводы.** При одном воздухопроводе, через который проходит воздушный поток V, полное необходимое давление H равно согласно (10-7) сумме частичных потерь давления. В соответствии с этим полное аэродинамическое сопротивление воздухопровода Z определяется по (10-8) как сумма частичных аэродинамических сопротивлений отдельных участков воздухопровода. Проводя аналогию с электрической цепью, мы получаем последовательное соединение частичных сопротивлений Z_i, что может быть представлено условной схемой замещения (рис. 10-11), для которой имеем:

$$Z = \sum Z_i = Z_{вх} + Z_{расш} + Z_{суж} + $$
$$+ Z_{\alpha} + Z_{тр} + Z_{вых}, \quad (10\text{-}25)$$

где $Z_{вх}$ — входное сопротивление;
$Z_{расш}$ — сопротивление при расширении каналов;
$Z_{суж}$ — сопротивление при сужении каналов;
Z_{α} — сопротивление при повороте каналов;
$Z_{тр}$ — сопротивление трения о стенки каналов;
$Z_{вых} = Z_d$ — сопротивление от потери скоростного давления при выходе воздуха в атмосферу.

При параллельных воздухопроводах по каждому из них проходит свой воздушный поток V_1, V_2 и т. д. Полное количество воздуха V, продуваемого через всю вентиляционную систему, равно:

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n = \sum_{1}^{n} V_x, \quad (10\text{-}26)$$

где n — число параллельных воздухопроводов.

Так как давление в месте общего входа воздуха одно и то же для всех воздухопроводов, так же как и давление в месте их выхода, то перепад давлений по всем воздухопроводам будет одинаковым:

$$H_1 = H_2 = \cdots = H_n = H. \quad (10\text{-}27)$$

В расчет вентиляции удобно ввести понятие эквивалентного аэродинамического сопротивления параллельных воздухопроводов

$$Z_э = \frac{H}{V^2} = \frac{H}{(V_1 + V_2 + \cdots + V_n)^2}. \quad (10\text{-}28)$$

Для определения $Z_э$ учтем, что на основании (10-2)

$$\left.\begin{aligned} V_1 &= \sqrt{H/Z_1}; \\ V_2 &= \sqrt{H/Z_2}; \\ &\cdots\cdots\cdots; \\ V_n &= \sqrt{H/Z_n}. \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}29)$$

Полное количество воздуха составит:

$$V = \sqrt{H/Z_э}.$$

Подставив равенства (10-29) в уравнение (10-26) и сократив на H, получим:

$$1/\sqrt{Z_э} = 1/\sqrt{Z_1} + 1/\sqrt{Z_2} + $$
$$+ \cdots + 1/\sqrt{Z_n}. \quad (10\text{-}30)$$

После соответствующего преобразования (10-30) эквивалентное аэродинамическое сопротивление

параллельных воздухопроводов будет равно:

$$Z_э = \frac{1}{(1/\sqrt{Z_1}+1/\sqrt{Z_2}+\cdots+1/\sqrt{Z_n})^2} = \frac{1}{\left(\sum_{x=1}^{n} 1/\sqrt{Z_x}\right)^2}. \quad (10\text{-}31)$$

В случае двух разветвленных воздухопроводов ($n=2$)

$$Z_э = \frac{Z_1 Z_2}{(\sqrt{Z_1}+\sqrt{Z_2})^2}. \quad (10\text{-}32)$$

Из равенства (10-27) следует:

$$Z_1 V_1^2 = Z_2 V_2^2 = \cdots = Z_n V_n^2. \quad (10\text{-}33)$$

Следовательно, соотношение расходов воздуха по двум воздухопроводам будет:

$$V_1/V_2 = \sqrt{Z_2/Z_1}. \quad (10\text{-}34)$$

Обычно электрическая машина имеет систему воздухопроводов, состоящую из участков, по которым движется весь воздушный поток, и ряда разветвленных воздухопроводов. Такую сложную систему воздухопроводов удобно представить в виде схемы замещения, аналогичной схеме замещения для одного воздухопровода (например, на рис. 10-12). Общее аэродинамическое сопротивление схемы по рис. 10-12 будет:

$$Z = Z_1 + Z_э + Z_4, \quad (10\text{-}35)$$

где $Z_э$ рассчитывается по (10-32).

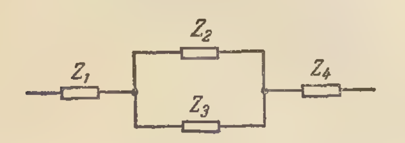


Рис. 10-12. Схема замещения сложного воздухопровода.

в) **Порядок расчета характеристики воздухопровода.** Для вентиляционного расчета следует иметь чертежи продольного и поперечного разрезов электрической машины. По этим чертежам выясняют пути воздушных потоков. Для этого накладывают на чертеж продольного разреза машины лист прозрачной бумаги (кальки) и набрасывают мягким карандашом линии воздушных струй с возможными их поворотами, плавным или резким сужением, расширением, с разделением на параллельные струи и т. п. По окончательно установленной картине этих струй и данным поперечных сечений каналов путей воздушных потоков производят расчет аэродинамических сопротивлений отдельных участков воздухопровода, как это показано в примерном расчете машины постоянного тока. В расчете приводят: 1) описание характеристики участка воздухопровода; 2) величину поперечного сечения участка S_i; 3) значение коэффициента аэродинамического сопротивления участка ξ_i; 4) значение аэродинамического сопротивления участка Z_i, рассчитанное по (10-10).

Суммируя значения Z_i в отдельных параллельных воздухопроводах, составляют схему замещения (рис. 10-12). Затем на основании такой схемы и уравнения (10-35) находят результирующее аэродинамическое сопротивление Z всей вентиляционной системы машины, определяющее характеристику воздухопровода по (10-2).

Описанная методика вентиляционного расчета в основных своих положениях применима для всех электрических машин.

Особенности вентиляционного расчета и некоторые вопросы охлаждения крупных электрических машин изложены в [Л. 76]; методика вентиляционного расчета турбогенераторов рассмотрена в [Л. 113, 113а и 114], гидрогенераторов — в [Л. 110 и 111].

10-3. ВЕНТИЛЯТОРЫ

Встроенный вентилятор, сидящий на валу электрической машины, должен создавать давление, достаточное для того, чтобы прогнать через машину необходимое количество воздуха. Конструктивная связь вентилятора с электрической машиной придает его проектированию ряд следующих особенностей:

1) скорость вращения вентилятора заранее предопределена ско-

ростью вращения машины; 2) размеры вентилятора и возможность применения диффузора[1], снижающего потери при входе воздуха, ограничены конструкцией электрической машины; 3) большое значение имеет к. п. д. вентилятора, так как потери последнего снижают общий к. п. д. машины; 4) основные величины—количество воздуха V и давление H, которые должен обеспечить вентилятор, определяются характеристикой воздухопровода машины; последняя в свою очередь обусловлена выбранной системой вентиляции (аксиальной, радиальной и др.), системой подвода и отвода воздуха; 5) важным фактором является бесшумная работа вентилятора.

Различают три типа вентиляторов, встраиваемых в электрическую машину:

центробежный, могущий обеспечить сравнительно высокие давления;

осевой, или пропеллерный, пригодный для больших объемов воздуха при низком давлении;

комбинированный, объединяющий особенности первого и второго типов.

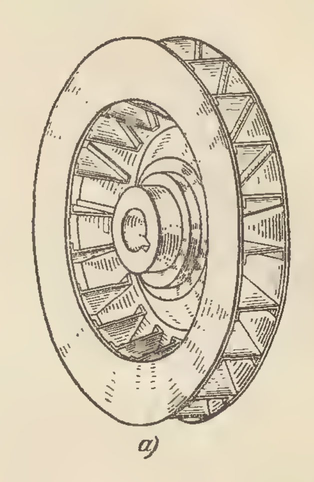
Схематически первый и второй типы вентиляторов изображены на рис. 10-13.

Принцип действия центробежного вентилятора заключается в том, что при вращении колеса с лопатками воздух, находящийся между лопатками, под действием центробежных сил выбрасывается наружу. При этом внутри вентиляторного колеса у входных отверстий образуется разрежение воздуха, а у выхода на внешнем диаметре вентиляторного колеса — повышенное давление.

В осевом вентиляторе воздух, захваченный крыльями, имеющими винтообразную форму, перемещается аксиально аналогично воздуху, перемещаемому пропеллером самолета. Сообщая скорость воздуху, осевой вентилятор создает на выходе воздуха за вентилятором повышенное давление.

[1] Диффузор представляет собой конус, направляющий воздух, входящий в машину.

Из перечисленных выше типов вентиляторов в электрических машинах чаще всего применяются центробежные вентиляторы, так как они создают давление, более всего соответствующее характеристике



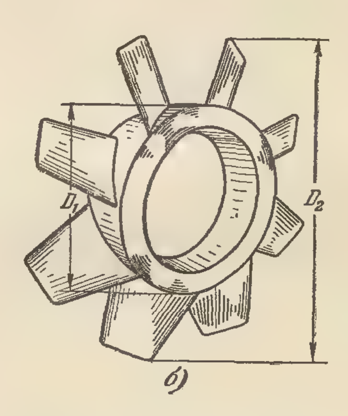


Рис. 10-13. Типы вентиляторов.

а — центробежный вентилятор с радиальными лопатками; *б* — осевой, или пропеллерный, вентилятор.

вентиляционных систем электрических машин. Основной недостаток центробежных вентиляторов—сравнительно низкий к. п. д. В то время как наибольший к. п. д. центробежного вентилятора с радиальными лопатками достигает 0,2, к. п. д. осевого вентилятора достигает 0,8. Осевой вентилятор применяется в быстроходных машинах, например турбогенераторах. Комбинированный вентилятор из-за относительной сложности изготовления применяется редко.

В дальнейшем мы остановимся на расчетах центробежных и осевых вентиляторов.

а) **Центробежные вентиляторы.** В зависимости от скорости вращения машины и необходимости ее реверса центробежные вентиляторы могут иметь следующие три основные формы лопаток:

1) для быстроходных нереверсивных машин наружные концы лопаток отгибаются против вращения колеса (рис. 10-14, *в*);

2) для тихоходных нереверсивных машин наружные концы лопаток отгибаются по вращению колеса вентилятора (рис. 10-14, *б*);

3) для реверсивных машин лопатки устанавливаются радиально (рис. 10-14, *а*).

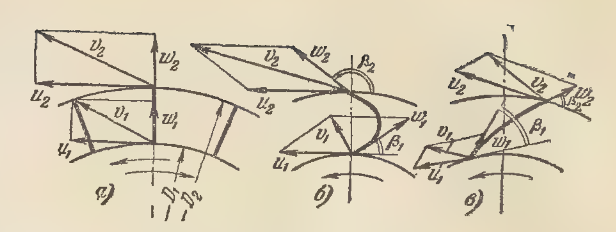


Рис. 10-14. Типы лопаток и диаграммы скоростей центробежных вентиляторов.

а — радиальные лопатки; *б* — то же с наклоном внешнего края лопаток по вращению вентилятора; *в* — то же, с наклоном внешнего края лопаток против вращения вентилятора.

Независимо от типа лопаток вентиляторное колесо может работать при вращении машины в любую сторону. Однако вентиляторы с наклонными лопатками, выполненные для одного направления вращения, работают при обратном направлении менее производительно и с худшим к. п. д. Характеристики вентилятора, т. е. зависимости статического давления H, развиваемого вентилятором, в функции расхода воздуха V при различных типах лопаток, приведены на рис. 10-15. Характеристики построены в относительных единицах. Там же даны кривые энергетического к. п. д. $\eta_э$ вентиляторов.

В теории вентиляторов указывается, что статическое давление, развиваемое вентилятором, может быть рассчитано по формуле

$$H = \eta_а \frac{\gamma}{g} [u_2 v_2 \cos(\overline{u_2}\, \overline{v_2}) - u_1 v_1 \cos(\overline{u_1}, \overline{v_1})], \qquad (10\text{-}36)$$

где $\eta_а$ — аэродинамический к. п. д. крыльев, учитывающий потери давления в самом вентиляторе;

$\gamma \approx 1{,}2$ *кг/м*³ — удельный вес воздуха;

$g = 9{,}81$ *м/сек*²;

u_1 и u_2 — окружные скорости по внутреннему и наружному диаметрам лопаток, *м/сек* (см. рис. 10-14);

v_1 и v_2 — абсолютные скорости движения частиц воздуха в окружающем пространстве, *м/сек* (рис. 10-14).

Абсолютные скорости воздуха получаются в результате геометрического сложения векторов окружной скорости u и средней относительной скорости w частиц воздуха относительно стенки лопатки (рис. 10-14).

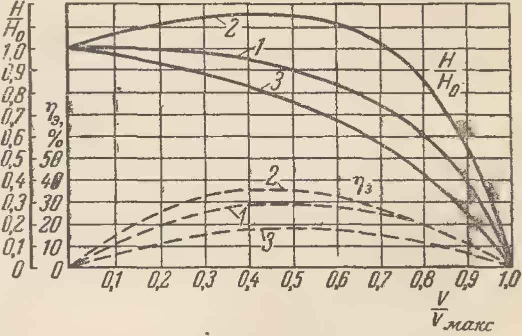


Рис. 10-15. Характеристики центробежных вентиляторов.

1 — для лопаток, наклоненных против вращения ($\beta_1 = \beta_2 = 25°$); *2* — для лопаток, наклоненных по вращению ($\beta_1 = 25°$; $\beta_2 = 155°$); *3* — для радиальных лопаток ($\beta_1 = \beta_2 = 90°$).

Примечание. β_1 — угол между векторами $\overline{w_1}$ и $(-\overline{u_1})$; β_2 — угол между векторами $\overline{w_2}$ и $(-\overline{u_2})$ (см. рис. 10-14).

На характеристиках вентиляторов (рис. 10-15) можно отметить две особые точки работы:

первая — «холостой ход» вентилятора, когда последний развивает статическое давление H_0 при отсутствии расхода воздуха ($V=0$), что соответствует точке $H/H_0=1$ и $V/V_{макс}=0$;

вторая — точка максимального расхода ($V=V_{макс}$) при давлении $H=0$; по аналогии с электрической машиной эту точку называют точкой «короткого замыкания».

Осуществить холостой ход вентилятора можно, если закрыть все отверстия по наружному диаметру вентиляторного колеса сплошной лентой (например, бумажной). В этом случае частицы воздуха, находящиеся между лопатками вентиляторного колеса, давят под действием центробежных сил на каждый квадратный метр ленты с силой H_0. Количество воздуха V, прогоняемое через вентилятор, при этом будет равно нулю.

Создать режим короткого замыкания вентилятора можно при отсутствии внешнего аэродинамического сопротивления, т. е. при работе вентилятора непосредственно в атмосферу. В этом случае внешний напор H (давление), создаваемый вентилятором, равен нулю, а количество воздуха, проходящее через вентилятор, максимально ($V_{макс}$).

Из треугольников скоростей на рис. 10-14 видно, что для лопаток с любым профилем при холостом ходе вентилятора, когда $V=0$ и относительные скорости $w_1=w_2=0$, абсолютные скорости частиц воздуха v_1 и v_2 равны окружным скоростям u_1 и u_2; при этом углы между соответствующими векторами $\bar{v}$ и $\bar{u}$ равны нулю. В таком случае при холостом ходе вентилятора статическое давление H_0, развиваемое им, составит на основании (10-36) и сказанного выше:

$$H_0=\eta_{a0}\frac{\gamma}{g}\left(u_2^2-u_1^2\right), \qquad (10\text{-}37)$$

где η_{a0} — аэродинамический к. п. д. вентилятора при холостом ходе; с точностью, достаточной для практики электромашиностроения, можно принять:

для лопаток, наклоненных назад (см. рис. 10-14, *в*),

$$\eta_{a0}=0{,}5; \qquad (10\text{-}38а)$$

для лопаток, наклоненных вперед (рис. 10-14, *б*),

$$\eta_{a0}=0{,}75; \qquad (10\text{-}38б)$$

для радиальных лопаток (рис. 10-14, *а*)

$$\eta_{a0}=0{,}6. \qquad (10\text{-}38в)$$

Для точки короткого замыкания ($H=0$) значение максимального расхода приближенно можно принять равным:

для лопаток, наклоненных назад относительно направления вращения вентилятора, при $\beta_1=\beta_2=25°$ (рис. 10-14, *в*)

$$V_{макс}\approx 0{,}35u_2S_2,\ м^3/сек; \qquad (10\text{-}39)$$

для лопаток, наклоненных вперед, при $\beta_1\approx 25°$ и $\beta_2\approx 155°$ (рис. 10-14, *б*)

$$V_{макс}\approx 0{,}5u_2S_2,\ м^3/сек; \qquad (10\text{-}39а)$$

для радиальных лопаток при $\beta_1=\beta_2=90°$ (рис. 10-14, *а*)

$$V_{макс}\approx 0{,}42u_2S_2,\ м^3/сек, \qquad (10\text{-}39б)$$

где S_2 — поперечное радиальное сечение для прохода воздуха на внешнем диаметре вентиляторного колеса, $м^2$;

$$S_2=0{,}92\pi D_2b. \qquad (10\text{-}40)$$

Здесь D_2 — внешний диаметр, *м* (см. рис. 10-14);
b — аксиальная ширина лопатки, *м*.

Коэффициент 0,92 в (10-40) учитывает уменьшение выходного сечения за счет толщины лопаток вентилятора.

Максимум к. п. д. при всех профилях лопаток наступает примерно при половине максимального расхода воздуха (рис. 10-15). Поэтому желательно, чтобы номинальный расход вентилятора при работе его в машине был близок к половине максимального расхода. Обычно номинальный расход принимают в пределах 0,4—0,6 максимального.

Для вентиляторов с радиальными лопатками характеристика $H=f(V)$, выраженная в относительных единицах, может быть достаточ-

но точно представлена следующим уравнением:

$$H/H_0 = 1 - (V/V_{макс})^2. \quad (10\text{-}41)$$

Мощность, потребляемая вентилятором, выражается формулой

$$P_в = 9{,}81\,\frac{HV}{\eta_э},\ вт, \quad (10\text{-}42)$$

где H — статическое давление, развиваемое вентилятором при работе, *кГ/м²* (*мм вод. ст.*);

V — номинальный расход воздуха, *м³/сек*;

$\eta_э$ — энергетический к. п. д. вентилятора.

Энергетический к. п. д. вентилятора, называемый также механическим, учитывает затрату механической работы, расходуемой на вращение вентилятора. Он имеет следующие наибольшие значения для вентиляторов, применяемых в электромашиностроении:

при лопатках, наклоненных назад, $\eta_э = 0{,}25 \div 0{,}30$;
при лопатках, наклоненных вперед, $\eta_э = 0{,}3 \div 0{,}4$;
при радиальных лопатках $\eta_э = 0{,}15 \div 0{,}2$. (10-43)

В вентиляторах с наклоненными лопатками с целью повышения к. п. д. угол наклона входной кромки лопатки β_1 выбирают с учетом того, чтобы при номинальном режиме работы вентилятора получался безударный вход воздуха между лопатками. Для этого выбирают угол β_1 таким образом, чтобы вектор w_1 относительной скорости воздуха у входной кромки лопатки был направлен параллельно ее стенке (рис. 10-16). Это условие будет выполнено, если $c_{r1} = u_1' \operatorname{tg}\beta_1$, как это видно из рис. 10-16. Здесь: c_{r1} — радиальная входная скорость воздуха; u_1' — тангенциальная составляющая скорости воздуха относительно вентиляторного колеса. Вектор c_{r1} определяется по количеству воздуха, проходящего через вентилятор на окружности входной кромки:

$$c_{r1} = V/S_1, \quad (10\text{-}44)$$

где S_1 — поперечное сечение через вентиляторное колесо на диаметре D_1 (см. рис. 10-14):

$$S_1 = 0{,}92\pi D_1 b. \quad (10\text{-}45)$$

Тангенциальная составляющая относительной скорости u_1' при отсутствии завихрения частиц воздуха под действием лопаток равнялась бы u_1, т. е. полной окружной скорости входной кромки лопатки. При попадании частиц воздуха на лопатку его относительная скорость становится равной нулю (частица воздуха перемещается тангенциально вместе с лопаткой). Следовательно, значение u_1' при входе в кромку лопатки будет $u_1 > u_1' > 0$. Принимая приближенно, что струя воздуха при входе в вентиляторное кольцо закручивается до $^1/_2\, u_1$, определим угол наклона лопатки:

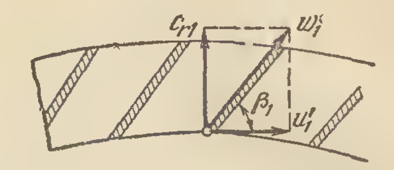


Рис. 10-16. Диаграмма скоростей воздуха у входа в вентиляторное колесо.

$$\beta_1 = \operatorname{arctg}\frac{c_{r1}}{u_1'} = \operatorname{arctg}\frac{2c_{r1}}{u_1}. \quad (10\text{-}46)$$

Как видно из (10-44), условие безударности входа (10-46) может быть выполнено только для одного значения расхода воздуха V. Так как вентиляторы с наклонными лопатками имеют максимум энергетического к. п. д. при $V = (0{,}4 \div 0{,}6)\ V_{макс}$, то условие безударного входа рассчитывают при указанном выше значении V.

Вентиляторы с радиальными лопатками вне зависимости от расхода воздуха не могут иметь безударного входа, что приводит к снижению к. п. д. вентилятора.

б) **Расчет центробежного вентилятора.** Расчет центробежного вентилятора заключается в определении диаметров D_1 и D_2 (см. рис.

10-14), наклона и аксиальной ширины лопатки. Так как вентиляторы с наклонными лопатками сложнее в изготовлении, чем вентиляторы с радиальными лопатками, то, как указывалось выше, в нормальных электрических машинах применяются главным образом последние. Ниже мы приведем порядок расчета вентилятора с радиальными лопатками.

Внешний диаметр вентиляторного колеса D_2 выбирают в соответствии с типом вентиляции и конструкцией машины. При аксиальной вентиляции D_2 выбирают обычно максимально возможным. Современные электрические машины, являясь высокоиспользуемыми с большими электромагнитными нагрузками, требуют предельного форсирования вентиляции, что легче обеспечивается при большом значении D_2.

По выбранному внешнему диаметру D_2 вентилятора определяется окружная скорость u_2:

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}, \ м/сек. \qquad (10\text{-}47)$$

Из условия максимального к. п. д. принимаем:

$$V_{макс} = 2V, \ м^3/сек, \qquad (10\text{-}48)$$

где V — заданный номинальный расход воздуха.

Из равенства (10-39б) определяем сечение на выходной кромке вентилятора:

$$S_2 = \frac{V_{макс}}{0{,}42\pi D_2}. \qquad (10\text{-}49)$$

Затем на основании уравнения (10-40) находим ширину лопаток вентилятора:

$$b = \frac{S_2 \cdot 100}{0{,}92\pi D_2}, \ см, \qquad (10\text{-}50)$$

где D_2 — выражено в метрах.

Внутренний диаметр колеса D_1 определяем из условия, что вентилятор работает при максимальном к. п. д., т. е. при $V = 0{,}5\,V_{макс}$ и $H = 0{,}75\,H_0$, как это следует из уравнения (10-41) или рис. 10-15. Давление, создаваемое вентилятором, должно быть достаточным, чтобы обеспечить падение давления в вентиляционной системе машины, т. е.:

$$H = ZV^2. \qquad (10\text{-}51)$$

Отсюда находим:

$$H_0 = \frac{H}{0{,}75} = \frac{ZV^2}{0{,}75}, \ кГ/м^2 \ (мм\ вод.\ ст.). \qquad (10\text{-}52)$$

С другой стороны, на основании уравнений (10-37) и (10-38)

$$H_0 = \eta_{a0}\frac{\gamma}{g}\left(u_2^2 - u_1^2\right) = \frac{1{,}2}{9{,}81}\left(u_2^2 - u_1^2\right) = 0{,}073\left(u_2^2 - u_1^2\right). \qquad (10\text{-}53)$$

По (10-53) находим окружную скорость на внутренней кромке вентиляторного колеса

$$u_1 = \sqrt{u_2^2 - \frac{H_0}{0{,}073}}, \ м/сек. \qquad (10\text{-}54)$$

Внутренний диаметр колеса D_1 получается равным:

$$D_1 = \frac{60 u_1}{\pi n}, \ м. \qquad (10\text{-}55)$$

Во встроенных вентиляторах отношение диаметров D_2/D_1 составляет примерно 1,2—1,5.

Число лопаток вентиляторного колеса может быть ориентировочно определено из формулы

$$N_л = (6 \div 10)\frac{D_2}{D_2 - D_1}. \qquad (10\text{-}56)$$

Для уменьшения вентиляционного шума рекомендуется выбирать число лопаток вентилятора так, чтобы оно равнялось простому числу. При вытяжной системе вентиляции могут быть рекомендованы числа лопаток, приведенные в табл. 10-2.

Таблица 10-2

Выбор числа лопаток вентилятора

Диаметр вентилятора, *мм*	200	250	300	350	400
Число лопаток	13	17	23	29	31

Ориентировочные значения размеров и числа вентиляционных лопаток, отливаемых заодно с короткозамыкающим кольцом в асинхронных двигателях с литой алюминиевой обмоткой на роторе, приведены в табл. 10-3 и на рис. 10-17.

Таблица 10-3

Размеры и число вентиляционных лопаток литой алюминиевой беличьей клетки (рис. 10-17)

Номинальная мощность двигателя, *квт* . . .	1—4,5	4,5—14	14—40	28—75	40—130
Синхронная скорость вращения, *об/мин* . .	3 000—1 000	3 000—750	3 000—750	3 000—750	3 000—750
Число лопаток	11 и 13	15—19	17 и 19	17 и 21 (20)	19 и 21
Аксиальная длина лопатки *a*, *мм*	48—40	75—65	85—75	95—85	105—95

Средняя высота лопатки $b = b_к - (5 \div 12)$ *мм*.
Средняя толщина лопатки 3—9 *мм*.

В заключение расчета определим мощность, потребляемую вентилятором:

$$P_в = 9{,}81 \frac{HV}{\eta_э}, \text{ вт}. \quad (10\text{-}57)$$

В системе координат $H - V$ следует построить характеристику воздухопровода электрической машины по уравнению (10-2) и характеристику вентилятора по уравнению (10-41) или, точнее, на основании рис. 10-15. Пересечение характеристик дает нам рабочую точку номинального режима вентилятора (рис. 10-18).

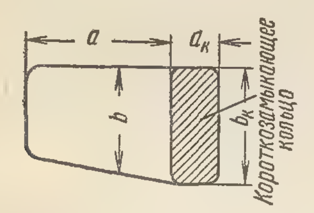


Рис. 10-17. Размеры литой вентиляционной лопатки

Конструкция самого вентилятора должна быть достаточно жесткой. Необходимо делать закругления входных и выходных кромок лопаток вентилятора и скруглять острые края отверстий в щите для входа и выхода воздуха. В месте выброса воздуха из вентилятора иногда устраивают камеру расширения, располагаемую в пространстве между внешней окружностью вентилятора и стенкой подшипникового щита. Такая камера заметно снижает шум и вентиляционные потери. Целесообразно применение проволочных сеток вместо штампованных для закрытия входных и выходных отверстий в щите.

При конструировании вентиляционной системы следует стремиться к тому, чтобы при движении воздуха не могло образоваться его завихрения. Нужно по возможности избегать внезапных изменений сечений воздухопровода, выступающих частей, рассекающих воздушный поток, и резких поворотов струй воздуха. Детали, образующие воздухопровод, должны иметь по возможности обтекаемую форму. Все эти мероприятия, с одной стороны, улучшают гидродинамику вентиляционной системы электрической машины, а с другой — приводят к устранению вентиляционного шума

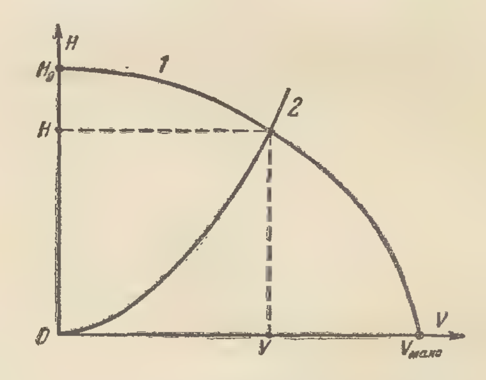


Рис. 10-18. Определение рабочей точки на характеристике $H - V$ — вентилятора.

1 — характеристика вентилятора; *2* — характеристика вентиляционной системы.

в) **Осевые вентиляторы.** Осевые, или пропеллерные, вентиляторы находят применение в высокооборотных электрических машинах. Эти вентиляторы обладают высоким к. п. д.

Познакомимся с особенностями работы и расчета осевых вентиляторов.

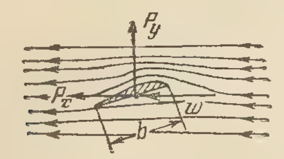


Рис. 10-19. Диаграмма сил, действующих на крыло.

Анализ работы этих вентиляторов основывается на базе теории поддерживающего крыла. Если рассмотреть крыло типа самолетного, находящееся в струе воздуха (рис. 10-19), то увидим, что на его обдуваемую поверхность действуют две взаимно перпендикулярные силы: подъемная сила P_y и сила лобового сопротивления P_x, направленная встречно движению потока воздуха. Согласно теории поддерживающего крыла эти силы равны:

$$\left.\begin{aligned} P_y &= (\gamma/g) c_y S w; \\ P_x &= (\gamma/g) c_x S w. \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}58)$$

Здесь: c_y, c_x — коэффициенты подъемной силы и соответственно силы лобового сопротивления;

S — площадь обдуваемой поверхности крыла;

w — скорость воздуха относительно крыла;

$\gamma/g \approx 0{,}122$ — удельная плотность воздуха, *кг·сек²/м⁴*.

Отношение сил P_y/P_x характеризует качество крыла. Согласно (10-58)

$$P_y/P_x = c_y/c_x.$$

Отношение c_y/c_x называется коэффициентом качества крыла. Для современных крыльев значения $c_y/c_x = 10 \div 15$, доходя до 20.

Коэффициенты c_y, c_x, c_y/c_x сильно зависят от угла атаки струи воздуха α, т. е. угла, образованного направлением скорости воздуха w с плоскостью крыла (см. рис. 10-22). Эти коэффициенты определяются опытным путем в аэродинамической трубе. На рис. 10-21 приведены кривые c_y, c_x, c_y/c_x для крыла, имеющего профиль, изображенный на рис. 10-20, построенный по координатам таблицы этого рисунка.

Для расчета осевого вентилятора рассмотрим картину скорости воздуха относительно элементарной площадки лопасти вентилятора с шириной b и радиальной высотой Δr, находящейся от оси вращения на расстоянии $r = D/2$.

Имеем следующие составляющие скорости воздуха:

1. Аксиальная скорость струи воздуха v, параллельная оси вращения. Эта скорость по мере прохода воздуха через ометаемую лопастями поверхность несколько увеличивается за счет сжатия воздуха.

2. Окружная, или тангенциальная, скорость u, направленная в обратную сторону вращения лопасти;

$$u = \frac{\pi D n}{60}, \quad (10\text{-}59)$$

где D — диаметр, на котором расположена рассматриваемая площадка;

n — скорость вращения вентилятора, *об/мин*.

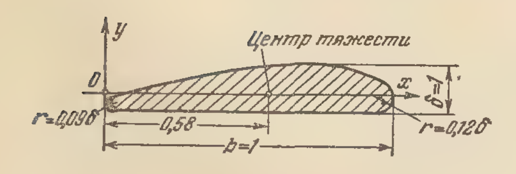


Рис. 10-20. Профиль крыла.

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	1,0
$y_{верх}$	—0,31	—0,034	0,172	0,347	0,473	0,561	0,591	0,600	0,561	0,386	0,192	—0,28
$y_{ниж}$	—0,31	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,4	—0,28

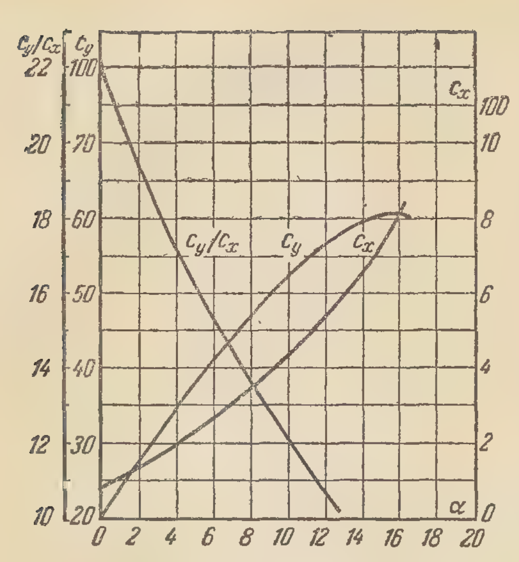


Рис. 10-21. Опытные кривые коэффициентов c_y, c_x, c_y/c_x для профиля крыла по рис. 10-20.

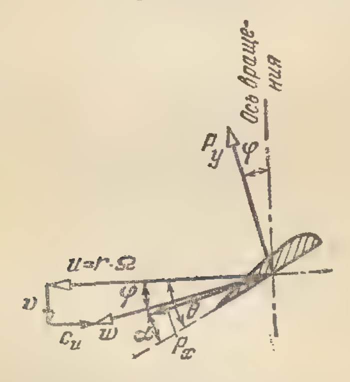


Рис. 10-22. Диаграмма скоростей на лопасти осевого вентилятора.

3. Скорость закручивания струи воздуха c_u. Эта скорость служит мерой уменьшения скорости u относительно лопасти вследствие увлечения (завихрения) воздуха лопастями.

На входной кромке лопасти скорость c_u практически равна нулю, возрастая до наибольшего значения на выходной кромке. Результирующая скорость w образуется как геометрическая сумма перечисленных выше составляющих (рис. 10-22). Эта скорость и обусловливает возникновение подъемной силы P_y и перпендикулярной ей силы лобового сопротивления P_x, действующих на рассматриваемые элементарные площадки лопастей. Сила P_y направлена к оси вращения вентилятора под углом φ. В основном она определяется давлением воздуха, которое должен создать вентилятор. Алгебраическая сумма проекций сил P_y и P_x на направление скорости v будет соответственно равна давлению воздуха:

$$P_y \cos\varphi - P_x \sin\varphi = H_{\text{в}} \pi D \Delta r, \quad (10\text{-}60)$$

где $H_{\text{в}}$ — расчетный напор вентилятора, отнесенный к ометаемой площади $\pi D \Delta r$, *кГ/м²*.

Учитывая (10-58) и принимая во внимание, что суммарная площадь элементарных площадок всех лопастей равна $S = ib\Delta r$, где i — число лопастей, получим вместо (10-60):

$$\frac{\gamma}{g} c_y i b w^2 \lambda_y = H_{\text{в}} \pi D. \quad (10\text{-}61)$$

Здесь

$$\lambda_y = \cos\varphi - c_x/c_y \sin\varphi; \quad (10\text{-}62)$$

b — ширина лопасти на диаметре D.

По уравнению (10-61) можно определить коэффициент подъемной силы c_y. Следует иметь в виду, что значение c_y/c_x не сильно влияет на величину λ_y.

Выбрав профиль поперечного сечения лопасти, находят по опытной кривой угол атаки α, а по нему — угол θ установки рассматриваемого сечения лопасти относительно оси вращения (рис. 10-22):

$$\theta = \alpha + \varphi. \quad (10\text{-}63)$$

Для вращения вентилятора необходимо приложить к его валу момент, преодолевающий действие сил лобового сопротивления P_x и частично подъемных сил P_y. Часть вращающего момента, уравновешивающего действие перечисленных сил, приложенных только к рассматриваемым элементарным площадкам, составит:

$$\Delta M = (P_x \cos\varphi + P_y \sin\varphi) r =$$

$$= \frac{\gamma}{g} c_y i b \Delta r w^2 r \lambda_x, \quad (10\text{-}64)$$

где

$$\lambda_x = \sin\varphi + c_x/c_y \cos\varphi. \quad (10\text{-}65)$$

Полезная работа вентилятора определится энергией движущегося

со скоростью v воздуха, затрачиваемая мощностью, создаваемой вращающим моментом, преодолевающим действие сил сопротивления. Отношение этих мощностей представит собой аэродинамический к. п. д. рассматриваемых элементарных площадок лопастей вентилятора:

$$\eta = \frac{H_в \pi D \Delta r\, v}{\Delta M \Omega},$$

где Ω — угловая скорость вращения лопастей.

Преобразуем выражение к. п. д., учитывая (10-61) и (10-64):

$$\eta = \frac{\lambda_y}{\lambda_x} \cdot \frac{v}{u}, \qquad (10\text{-}66)$$

где $u = \Omega r$ — окружная скорость на радиусе r.

Ввиду несовершенства шлифовки поверхности лопастей действительный к. п. д. обычно меньше. Учтем это введением коэффициента 0,9:

$$\eta \approx 0{,}9\, \frac{\lambda_y}{\lambda_x} \cdot \frac{v}{u}. \qquad (10\text{-}67)$$

г) **Расчет осевого вентилятора.** Как уже указывалось, аксиальная скорость воздуха и скорость закручивания c_u от входной до выходной кромки лопасти изменяются. Для упрощения расчета ориентируются на средние значения скоростей. Принимают:

$$v = (1{,}15 \div 1{,}25)\, v_0; \qquad (10\text{-}68)$$

$$c_u \approx 0{,}5 c_{u(\text{макс})}, \qquad (10\text{-}69)$$

где $v_0 = \dfrac{V}{\pi/4\left(D_2^2 - D_1^2\right)}$ — скорость воздуха при входе в вентилятор, *м/сек*;

V — секундный расход воздуха, *м³/сек*;

$c_{u(\text{макс})}$ — наибольшая скорость закручивания у входной кромки;

D_2 и D_1 — наружный и внутренний диаметры лопастей.

На внутреннем диаметре у втулки вентилятора принимают $c_{u(\text{макс})} \approx 0{,}2\, u_1$. Для других диаметров справедливо соотношение

$$c_{u1(\text{макс})} D_1 = c_{u2(\text{макс})} D_2 = c_{u(\text{макс})} D. \qquad (10\text{-}70)$$

При определении числа лопастей задаются коэффициентом массивности колеса

$$\sigma_1 = \frac{i b_1}{\pi D_1}, \qquad (10\text{-}71)$$

где b_1 — ширина лопасти на диаметре D_1.

Для вентиляторов, сидящих непосредственно на хвостовике ротора, выбирают $\sigma_1 = 1{,}1 \div 1{,}2$; для вентиляторов большого диаметра $\sigma_1 = 1{,}0 \div 1{,}1$.

Ширина лопасти b_1 принимается из условия, чтобы отношение радиальной высоты лопасти h к ширине b_1 было в пределах 1—2:

$$h/b_1 = 1 \div 2. \qquad (10\text{-}72)$$

Соотношения (10-71) и (10-72) позволяют установить число лопастей i, которое берут обычно четным.

Далее выбирают профиль поперечного сечения лопасти (см. рис. 10-20). Чтобы вычислить угол установки θ_1 для рассматриваемого сечения лопасти на диаметре D_1, определяют по диаграмме скоростей (рис. 10-22) значения w_1 и φ_1. Приняв предварительное значение коэффициента c_y/c_x, по (10-61) и (10-62) вычисляют коэффициент c_y. Затем из опытной кривой (рис. 10-21) находят угол атаки α и проверяют величину c_y/c_x. Угол θ_1 вычисляют по (10-63). В заключение определяют по (10-67) к. п. д. для рассмотренного сечения лопасти.

Можно принять для остальных сечений по высоте лопасти значения v, c_y, c_x, c_y/c_x и α неизменными. По (10-69) и (10-70) вычисляют скорости c_u, находят по диаграмме скоростей значения w и φ, рассчитывают по (10-61) ширину сечений лопасти b и по (10-63) угол θ установки сечения.

В заключение для каждого сечения находят к. п. д.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) всего вентилятора принимают как среднее арифметическое из значений к. п. д. всех сечений.

С целью упрощения допустимо вычислять к. п. д. по крайним сечениям на диаметрах D_1 и D_2.

Мощность, потребляемую вентилятором, рассчитывают по (10-42).

д) Примеры расчета вентиляторов. 1. *Центробежный вентилятор.* Пример расчета центробежного вентилятора с радиальными лопатками дан в примерах расчета машин постоянного тока (см. гл. 12).

2. *Осевой вентилятор.* Задано: $V=4{,}27$ *м³/сек*; $\Sigma H_i=152$ *кГ/м²*; $n=3\,000$ *об/мин*; диаметр по втулке $D_1=330$ *мм*; диаметр наружный $D_2=635$ *мм*.

Аксиальная скорость воздуха по (10-68)

$$v_1 \approx 1{,}2\frac{V}{\pi/4\left(D_2^2-D_1^2\right)} = 1{,}2\frac{4{,}27}{\pi/4\,(0{,}635^2-0{,}33^2)} = 22{,}1 \text{ м/сек}.$$

Полный напор вентилятора по (10-7)

$$H=\Sigma H_i+\xi_d v_1^2 = 152+61\cdot 10^{-3}\cdot 22{,}1^2 = 182 \text{ кГ/м}^2.$$

Определим высоту лопасти:

$$h=\frac{1}{2}(D_2-D_1)=\frac{1}{2}(635-330)=152 \text{ мм}.$$

Возможные размеры ширины лопасти у втулки по (10-72)

$$i=\frac{h}{1\div 2}=\frac{152}{1\div 2}=152\div 76 \text{ мм}.$$

Возможные пределы числа лопастей при $\sigma_1=1{,}2$ по (10-71)

$$i=\frac{\sigma_1\pi D_1}{b_1}=\frac{1{,}2\pi\cdot 330}{152\div 76}=8\div 16.$$

Примем $i=10$. Тогда $b_1=124$ *мм*.

Окружная скорость u_1 втулки по (10-59)

$$u_1=\frac{\pi D_1 n}{60}=\frac{\pi\cdot 0{,}33\cdot 3\,000}{60}=52 \text{ м/сек}.$$

Скорость w_1 у втулки по рис. 10-22 и формуле (10-69)

$$w_1=\sqrt{v_1^2+\left(0{,}9u_1\right)^2}=\sqrt{22{,}1^2+(0{,}9\cdot 52)^2}=51{,}6 \text{ м/сек}.$$

Угол φ_1 у втулки по рис. 10-22

$$\varphi_1=\arcsin\frac{v_1}{u_1}=\arcsin\frac{22{,}1}{52}=25°.$$

Задаемся коэффициентом качества крыла $c_y/c_x=12{,}5$.

Вычисляем по (10-62):

$$\lambda_y=\cos\varphi_1-c_x/c_y\cdot\sin\varphi_1=0{,}904-\frac{0{,}425}{12{,}5}=0{,}87.$$

Определяем коэффициент подъемной силы по (10-61):

$$c_y=\frac{H_в\pi D_1}{(\gamma/g)ib_1 w_1^2\lambda_{y1}}=\frac{182\ \pi\cdot 0{,}33}{0{,}122\cdot 10\cdot 0{,}124\cdot 51{,}6^2\cdot 0{,}87}=0{,}52.$$

Берем профиль поперечного сечения лопасти по рис. 10-20. Тогда из кривых на рис. 10-21 получим:

$\alpha=9{,}5°$; $c_y/c_x=12{,}1$ (что достаточно близко к предварительному значению);

$$c_x=0{,}042.$$

Угол θ_1 установки лопасти у втулки по (10-63)

$$\theta_1=\alpha+\varphi_1=9{,}5+25=34{,}5°.$$

Вычисляем по (10-67) к. п. д.:

$$\eta_1=0{,}9\frac{\lambda_{y1}}{\lambda_{x1}}\cdot\frac{v_1}{u_1}=0{,}9\cdot\frac{0{,}869}{0{,}5}\cdot\frac{22{,}1}{52}=0{,}66,$$

где по (10-62) и (10-65):

$$\lambda_{y1}=\cos\varphi_1-(c_x/c_y)\cdot\sin\varphi_1=0{,}904-\frac{0{,}425}{12{,}1}=0{,}869;$$

$$\lambda_{x1}=\sin\varphi_1+(c_x/c_y)\cos\varphi_1=0{,}425+\frac{0{,}904}{12{,}1}=0{,}5.$$

Произведем аналогичные расчеты для сечения лопасти на диаметре D_2, приняв значения c_y/c_x, c_y, c_x и α неизменными.

Окружная скорость u_2 по (10-59)

$$u_2=\frac{\pi D_2 n}{60}=\frac{\pi\cdot 0{,}635\cdot 3\,000}{60}=100 \text{ м/сек}.$$

Скорость закручивания струи по (10-69) и (10-70)

$$c_{u2}=c_{u1}\frac{D_1}{D_2}=0{,}1u_1\frac{D_1}{D_2}=0{,}1\cdot 52\cdot\frac{330}{635}=2{,}7 \text{ м/сек},$$

где $c_{u1}=0{,}5\,c_{u1(\text{макс})}=0{,}5\,(0{,}2u_1)=0{,}1\,u_1$.

Скорость w_2 по рис. (10-22)

$$w_2=\sqrt{v_2^2+\left(u_2-c_{u2}\right)^2}=\sqrt{22{,}1^2+(100-2{,}7)^2}=99 \text{ м/сек}.$$

Угол φ_2 определяем из равенства

$$\varphi_2 = \arcsin\frac{v_2}{u_2} = \arcsin\frac{22,1}{100} \approx 13°.$$

Угол установки сечения лопасти по (10-63)

$$\theta = \alpha + \varphi_2 = 9,5 + 13 = 22,5°.$$

Ширина лопасти по (10-61)

$$b_2 = \frac{H_в \pi D_2}{(\gamma/g) i c_y w_2^2 \lambda_{y2}} =$$

$$= \frac{182\pi \cdot 0,635}{0,122 \cdot 10 \cdot 0,52 \cdot 99^2 \cdot 0,95} = 0,06\ м,$$

где

$$\lambda_{y2} = \cos\varphi_2 - (c_x/c_y)\sin\varphi_2 = 0,95.$$

Коэффициент полезного действия работы конца лопасти по (10-67)

$$\eta_2 = 0,9\ \frac{\lambda_{y2}}{\lambda_{x2}} \cdot \frac{v_2}{u_2} =$$

$$= 0,9 \cdot \frac{0,95}{0,312} \cdot \frac{22,1}{100} = 0,61,$$

где

$$\lambda_{x2} = \sin\varphi_2 + (c_x/c_y)\cos\varphi_2 = 0,312.$$

Коэффициент полезного действия вентилятора

$$\eta_в = \frac{1}{2}(\eta_1 + \eta_2) =$$

$$= \frac{1}{2}(0,66 + 0,61) = 0,635.$$

Мощность, потребляемая вентилятором,

$$P_в = 9,81\frac{VH}{\eta_в} =$$

$$= 9,81 \cdot \frac{4,27 \cdot 182}{0,635} = 12\,000\ вт.$$

Ширина лопасти b и углы установки других сечений определяются аналогично. Для упрощения технологии изготовления лопастей поступают иногда следующим образом.

Угол θ определяют из условия

$$\pi D_1 \operatorname{tg}\theta_1 = \pi D_2 \operatorname{tg}\theta_2 = \pi D \operatorname{tg}\theta.$$

Определив по скорости w угол φ, вычисляют угол атаки α:

$$\alpha = \theta - \varphi.$$

По кривой $c_y = f(\alpha)$ находят c_y. Дальнейший расчет аналогичен указанному в примере.

10-4. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА

Как отмечалось, в машинах с радиальной вентиляцией принудительное движение воздуха осуществляется как с помощью ветрениц, располагаемых в радиальных каналах, так и с помощью лопаток, устанавливаемых на торцевых частях обмотки ротора (асинхронные машины), или ковшевидных лопаток, пристраиваемых на торцах ротора синхронных явнополюсных машин. В обычном вентиляционном расчете все эти устройства принимают за некоторый эквивалентный центробежный вентилятор, имеющий расчетную ширину лопатки, равную сумме аксиальных размеров ветрениц, вентилирующих крылышек или лопаток.

Для быстрой оценки вентиляции машины пользуются приближенным методом, позволяющим ориентировочно определить производительность вентилирующего устройства и оценить условия охлаждения проектируемой машины.

Приближенный метод, основанный на данных заводского опыта, заключается в следующем.

Определяют необходимое количество охлаждающего воздуха:

$$V = \frac{\Sigma P_в}{c_в \theta_в},\ м^3/сек.$$

Рассчитывают по эмпирической формуле количество воздуха, доставляемое вентиляционным устройством ротора:

$$V' = q_0 (n_в b_в + m)\frac{n_н}{100} \times \left(\frac{D}{100}\right)^2,\ м^3/сек, \qquad (10\text{-}73)$$

где q_0 и m — опытные коэффициенты:

для машин постоянного тока

$$q_0 = 31,5 \cdot 10^{-3};\quad m = 10;$$

для асинхронных машин

$$q_0 = 26 \cdot 10^{-3};\quad m = 10;$$

для явнополюсных синхронных машин $m = \Sigma b_в$

$q_0 = 25 \cdot 10^{-3}$ при $l_1 < 50\ см$;
$q_0 = (25 \div 22) \cdot 10^{-3}$ при $50\ см < l_1 < 100\ см$;
$q_0 = (22 \div 18,7) \cdot 10^{-3}$ при $100\ см < l_1 < 150\ см$;

$n_в$, $b_в$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов;
$\Sigma b_в$ — суммарная ширина ковшевидных лопаток;

$n_н$ — номинальная скорость вращения, *об/мин*;

D — диаметр якоря или ротора (по расточке статора).

Все размеры в (10-73) берут в сантиметрах.

Далее находят ориентировочное значение напора H, развиваемое вентиляционным устройством ротора, по формуле

$$H \approx 0{,}8\left(\frac{n_н}{100}\right)^2 \times$$

$$\times \left(\frac{D}{100}\right)^2, \ кГ/м^2 \ (мм \ вод.ст.). \quad (10\text{-}74)$$

Определяют мощность, расходуемую на вентиляцию:

$$P_в \approx 0{,}175\left(\frac{v}{10}\right)^2 V', \ квт, \quad (10\text{-}75)$$

где v — окружная скорость ротора или вентиляционных крыльев, *м/сек*.

После указанных расчетов сопоставляют значения V' и V. Если $V' \geqslant V$, то вентиляционное устройство обеспечивает необходимые условия охлаждения. Если же $V' < V$, то вентиляционное устройство недостаточно и его необходимо усилить или добавлением вентиляционных лопаток, если они отсутствовали, или увеличением их размеров, или, наконец, установкой отдельного вентилятора.

В защищенных машинах с аксиальной вентиляцией во многих случаях можно ограничиться упрощенным вентиляционным расчетом [Л. 88].

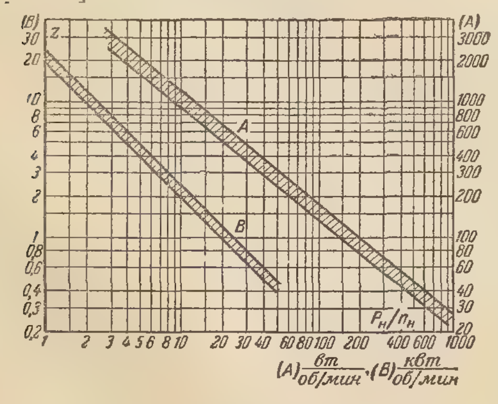


Рис. 10-23. Зависимость аэродинамического сопротивления Z вентиляционной системы электрической машины от величины $P_н/n_н$.

Из кривых на рис. 10-23, полученных по данным расчета и испытаний большого количества электрических машин, заимствуют ориентировочное значение Z — аэродинамического сопротивления вентиляционной системы машины, предварительно определив для машины значение $P_н/n_н$. Далее определяется по (10-1) необходимое количество охлаждающего воздуха $V_н$, по которому находится соответствующий напор $H_н$, требуемый от вентилятора [см. (10-2)].

Дальнейший расчет сводится к определению размеров вентилятора (см. п. 10-3, б или 10-3, г).

10-5. О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

При жидкостном охлаждении в активных частях электрической машины устраивают каналы, по которым циркулирует охлаждающая жидкость. Характерной особенностью этих каналов по сравнению с вентиляционными каналами газового охлаждения является их относительно большая протяженность. Отношение длины каналов к их диаметру при газовом охлаждении может достигать 30, а при жидкостном — в 100—160 раз больше [Л. 76]. Это объясняется тем, что при высокой эффективности теплосъема жидкостью (см. табл. 11-2) принимаются низкие скорости движения охлаждающей жидкости, достигающие значений 0,5—5,0 *м/сек*. А при таких скоростях перепад давлений в каналах невелик, что позволяет значительно увеличивать их длину.

При длинных каналах основную роль в гидравлическом расчете играет сопротивление трения каналов; местные сопротивления входа, расширений, сужений, поворотов и выхода оказываются, как правило, настолько незначительными, что ими можно пренебречь. Поэтому гидравлическое сопротивление охлаждающей системы последовательно соединенных каналов можно принять по (10-8) равным:

$$Z = \Sigma Z_i, \quad (10\text{-}8а)$$

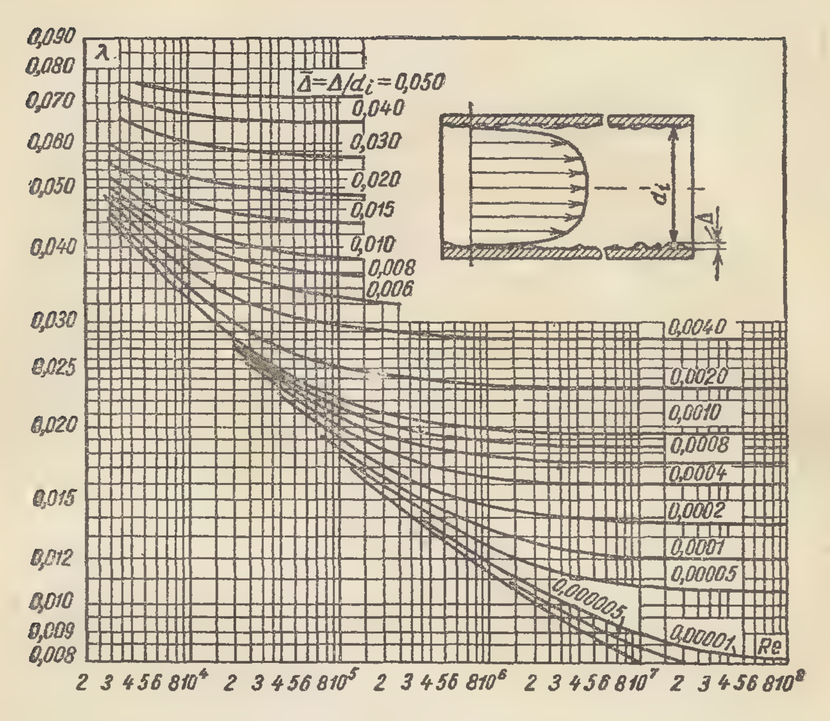


Рис. 10-24. Значения коэффициента трения λ_i в каналах при турбулентном движении охлаждающей среды.

где Z_i — гидравлическое сопротивление i-го канала по (10-10);

$$Z_i = \xi_i / S_i^2; \qquad (10\text{-}10a)$$

ξ_i — коэффициент гидравлического сопротивления трения по (10-20) рассматриваемого канала:

$$\xi_i = \frac{\gamma}{2g} \lambda_i l_i / d_i; \qquad (10\text{-}20a)$$

γ — удельный вес охлаждающей жидкости, *кг/м³*;

g — 9,81 *м/сек²*;

λ_i — коэффициент трения жидкости о стенки канала;

l_i — длина i-го канала, *м*;

d_i — гидравлический диаметр канала, *м*;

S_i — поперечное сечение канала, *м²*.

Значение λ_i зависит от характера движения жидкости (ламинарное или турбулентное движение, см. гл. 11) и шероховатости стенок канала. Характер движения определяется безразмерным критерием Рейнольдса Re (11-33).

Значение λ_i для гладкостенных каналов вычисляется:

а) при ламинарном движении (значение Re<2 300) — по формуле Пуазейля

$$\lambda_i = \frac{64}{\text{Re}}; \qquad (10\text{-}76a)$$

б) при турбулентном движении (значение Re>2 300) — по формуле Блазиуса

$$\lambda_i = 0{,}316 \sqrt[4]{\text{Re}}. \qquad (10\text{-}76б)$$

Для каналов с шероховатыми стенками значение λ_i можно взять по рис. 10-24 в зависимости от критерия Re и относительной шероховатости стенок канала $\bar{\Delta}$*:

$$\bar{\Delta} = \Delta / d_i, \qquad (10\text{-}77)$$

где Δ — абсолютная шероховатость, *м*.

Ориентировочное значение абсолютной шероховатости приведено в табл. 10-4 [Л. 76].

* Данные рис. 10-24 можно использовать для расчета газового охлаждения.

Таблица 10-4

Ориентировочные значения абсолютной шероховатости стенок охлаждающих каналов

Тип канала	Δ, *мм*
Аксиальные каналы в активной стали шихтованного статора	0,50—0,40
Сверленые аксиальные каналы в активной стали ротора	0,30—0,20
Соединительные резиновые шланги	0,20—0,10
Тянутые стальные трубы, укладываемые в пазы активной стали	0,10—0,05
Тянутые латунные трубы, применяемые как элементы теплообменников	0,06—0,03

Поперечное сечение канала S_i вычисляется по его гидравлическому диаметру d_i:

$$S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}, \text{ м}^2. \qquad (10\text{-}78)$$

При выбранной скорости движения v охлаждающей жидкости ее расход составит:

$$V = vS_i, \text{ м}^3/\text{сек}, \qquad (10\text{-}79)$$

а перепад давления в охлаждающей системе по (10-2)

$$H = ZV^2, \text{ кГ/м}^2. \qquad (10\text{-}2а)$$

По значениям V и H выбирается из каталогов насос для подачи охлаждающей жидкости в систему водяного охлаждения.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

11-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Работа любого преобразователя энергии, в том числе электрической машины, сопровождается потерями энергии. Тепло, создаваемое этими потерями, нагревает отдельные части электрической машины, повышая их температуру.

Чрезмерное повышение температуры может вызвать в электрических машинах снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток. Величина допустимой предельной температуры определяется классом нагревостойкости изоляции обмоток.

Краткая характеристика электроизоляционных материалов, соответствующих различным классам нагревостойкости, и допустимые температуры для них приведены в гл. 2 (см. табл. 2-6).

Превышение допустимой температуры на 10—12° С сокращает срок службы изоляции примерно вдвое (см. § 2-3).

При заданном режиме работы температура частей электрической машины будет зависеть от температуры охлаждающей среды.

В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды вводят понятия перегрева, или превышения температуры, частей электрической машины над температурой охлаждающей среды Θ:

$$\Theta = \vartheta - \vartheta_{ox}, \qquad (11\text{-}1)$$

где ϑ — температура рассматриваемой части электрической машины;

ϑ_{ox} — температура охлаждающей среды.

На нагревание электрической машины влияет режим ее работы, т. е. характер изменения нагрузки машины во времени.

Согласно ГОСТ 183-66 на общие технические требования к электрическим машинам установлены четыре основных номинальных режима работы: 1) продолжительный; 2) кратковременный с длительностью рабочего периода 10, 30, 60 и 90 *мин*; 3) повторно-кратковременный с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25; 40 и 60% длительности одного цикла работы и 4) перемежа-

Предельные допускаемые превышения температуры частей электрических машин не более 1 000 *м*

Части электрических машин	Изоляционный материал A: методом термометра	A: методом сопротивления	A: методом температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	E: методом термометра	E: методом сопротивления
	Предельные допускаемые превы				
Обмотки переменного тока машин мощностью 5 000 *ква* и выше или с длиной сердечника 1 *м* и более . .	—	60	60	—	70
Обмотки: а) обмотки переменного тока машин мощностью менее 5 000 *ква* с длиной сердечника менее 1 *м*; б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3, 4 и 5 настоящей таблицы; в) якорные обмотки, соединенные с коллектором.	50	60	—	65	75
Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—
Обмотки: а) однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями; б) стержневые обмотки роторов асинхронных машин.	65	65	—	80	80
Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки . .	60	60	—	75	75
Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—
Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя . . . . . . ; Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с обмотками .	Превышение температуры этих частей не должно другиx смежных				
Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с обмотками . .	60	—	—	75	—
Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные . . .	60	—	—	70	—

Таблица 11-1

при температуре газообразной охлаждающей среды +40° С и высоте над уровнем моря (ГОСТ 183-66)

класса (ГОСТ 8865-58)									
	B			F			H		
шения температуры, °С, при измерении									
методом температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов при укладке их между катушками в одном пазу
70	—	80	80	—	100	100	—	125	125
—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
—	—	90	—	—	110	—	—	—	—
—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или материалов									
—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

ющийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и холостого хода (без выключения машины) с продолжительностью нагрузки ПН-15; 25, 40 и 60% длительности одного цикла работы.

Номинальные данные электрической машины (мощность, напряжение, ток, скорость вращения, коэффициент мощности, к. п. д. и другие величины), указываемые на ее щитке, относятся к работе машины на высоте до 1 000 *м* над уровнем моря при температуре газообразной охлаждающей среды до +40° С и охлаждающей воды до +30° С, но не выше 33° С, если в стандартах или технических условиях на рассматриваемую машину нет других указаний.

Предельные допускаемые превышения температуры частей электрических машин, приведенные в табл. 11-1, установлены ГОСТ 183-66.

Предельные допускаемые превышения температуры для некоторых видов машин установлены особыми стандартами. Например:

для турбогенераторов — ГОСТ 533-51;
для гидрогенераторов — ГОСТ 5616-63;
для синхронных компенсаторов — ГОСТ 609-66.

Превышения температуры для машин с кратковременным режимом работы или ограниченным сроком службы указываются в стандартах или технических условиях на эти машины; при отсутствии таких указаний можно использовать данные табл. 11-1, повысив их на 10° С.

Для закрытых машин с напряжением не более 1 500 *в* допустимо повысить на 5° С превышение температуры обмоток, указанное в п. п. 2 и 4 табл. 11-1, измеренное методом сопротивления.

Допускаемые превышения температуры коллекторов и контактных колец могут превосходить значения, указанные в п. п. 10 табл. 11-1, при условии, если:

а) превышения температуры изоляционных материалов коллектора и контактных колец и связанных с ними обмоток не будут превосходить значений, указанных в подпунктах 2в и 4б табл. 11-1 для материалов соответствующих классов;

б) повышенная температура не ухудшит коммутацию;

в) температура не будет достигать значений, опасных для паек соединений;

г) при изоляции классов F и Н применяется легированная медь или иной материал, сохраняющий твердость при повышенной рабочей и технологической температуре.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части электрической машины определяется суммой значения температуры, взятой из табл. 11-1, и температурой +40° С, предельно допускаемой температурой охлаждающей среды, принятой при составлении табл. 11-1.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений:

для подшипников скольжения — 80° С (температура масла не должна быть при этом выше 65° С);
для подшипников качения — 100° С.

Необходимость повысить использование активных материалов в связи с ростом единичной мощности машины первоначально обусловила применение в качестве охлаждающей среды водорода вместо воздуха, а в дальнейшем переход к системе непосредственного охлаждения проводников обмотки, при которой имеет место непосредственное соприкосновение проводников с охлаждающим агентом.

При непосредственном охлаждении применяют в качестве охлаждающей среды не только газ (газовое охлаждение), но и жидкости, как-то: воду, масло (жидкостное охлаждение). В табл. 11-2 приведены для сравнения приближенные значения эффективности теплосъема и некоторые физико-технические параметры применяемых охлаждающих сред (даны в относительных величинах).

При проектировании электрической машины расчетное определение превышения температуры позволяет проконтролировать допустимость выбранных электромагнит-

Таблица 11-2

Сравнение свойств различных охлаждающих сред (в относительных величинах)

Охлаждающая среда	Приблизительная эффективность теплосъема (ЭТ)	Практически возможная скорость движения охлаждающей среды v	Удельная теплоемкость c	Плотность γ
Воздух	1,0	1,0	1,0	1,0
Гелий при 0,035 *ат** . .	0,75	1,0	5,25	0,138
Водород при 3 *ат*	3,0	1,0	14,35	0,21
Водород при 4 *ат*	4,0	1,0	14,35	0,28
Масло	21,0	0,012	2,09	848,0
Вода	50,0	0,012	4,16	1000,0

Примечание. $ЭТ = vc\gamma$.

* Здесь и далее давление избыточное.

ных нагрузок, без снижения надежности работы машины при высоком использовании активных материалов.

В тепловом расчете электрической машины ставится задача определить превышение температуры различных частей машины (их перегрев) над температурой окружающей среды. За допустимые превышения температуры обмоток электрических машин при расчете принимаются те, которые приведены в табл. 11-1 для случая определения их по методу сопротивления. В соответствии с режимами работы машин различают: а) расчет установившегося теплового режима, имеющего место при столь длительной работе машины, что дальнейшего повышения температуры уже не происходит; б) расчет неустановившихся тепловых режимов, соответствующих кратковременным режимам работы машин.

В электрических машинах общепромышленного применения, предназначенных обычно для длительной работы, производят расчет установившегося теплового режима.

Однако для ряда электрических машин, работающих в различных регулируемых электроприводах, требуется рассчитывать неустановившиеся тепловые процессы. Осуществление таких расчетов встречает большие трудности, и для их выполнения обычно приходится принимать электрическую машину или ее отдельные исследуемые части за однородное тело.

11-2. ВОПРОСЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопередача в охлаждающую среду происходит путем теплопроводности частей машины и теплорассеяния с охлаждаемых поверхностей.

Для подавляющего большинства электрических машин в качестве охлаждающей среды используется воздух, который и будет рассматриваться в анализе процессов теплопередачи[1].

Теплоотдача на границе нагретой поверхности и охлаждающего воздуха определяется опытным законом Ньютона — Рихмана, согласно которому рассеиваемый поверхностью тепловой поток равен:

$$Q = \alpha(\vartheta - \vartheta_{ох})S = \alpha\Theta S, \ вт. \quad (11\text{-}2)$$

Соответственно перепад температуры Θ между поверхностью и воздухом составит:

$$\Theta = \frac{Q}{\alpha S} = \frac{q}{\alpha}, \ ^\circ C, \quad (11\text{-}3)$$

где q — плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности S:

$$q = Q/S, \ вт/см^2; \quad (11\text{-}4)$$

α — коэффициент теплоотдачи поверхности.

На пути движения потока Q возникают перепады температуры в изоляции обмоток, сердечниках статоров (роторов), при переходе тепла с поверхностей к охлаждающему воздуху и др.

Согласно основному закону теплопроводности плотность теплового потока в направлении его движения прямо пропорциональна температурному градиенту в этом же направлении:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} \Theta. \quad (11\text{-}5)$$

[1] Этот анализ применим и для других охлаждающих сред.

Коэффициент λ называется **коэффициентом теплопроводности** или **удельной теплопроводностью**. Знак минус поставлен потому, что при положительном направлении теплового потока температурный градиент является отрицательным, т. е. в этом направлении температура понижается.

При одномерном течении тепла, например, в направлении оси x имеем:

$$\operatorname{grad}\Theta = \frac{d\Theta}{dx}. \qquad (11\text{-}6)$$

В табл. 11-3 приведена удельная теплопроводность различных материалов (см. стр. 313).

Электрическая машина является сложным сочетанием разнородных тел, обладающих неодинаковыми физическими свойствами. Поэтому определение картины теплового поля при установившемся режиме и наличии внутренних источников тепла потребовало бы решения системы дифференциальных уравнений Пуассона, имеющих для каждого тела в отдельности следующий вид:

$$\lambda_x \frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2\Theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2\Theta}{\partial z^2} + p = 0, \qquad (11\text{-}7)$$

где λ_x, λ_y, λ_z — удельные теплопроводности по осям x y, z в рассматриваемом элементарном объеме тела;

p — количество тепла, или удельные потери, выделяемые в том же объеме, *вт/см*^{3}.

При отсутствии источников тепла в рассматриваемом объеме и одномерном течении теплового потока получим уравнение

$$\lambda_x \frac{d^2\Theta}{dx^2} = 0,$$

откуда в результате решения его найдем

$$\Theta = c_1 x + c_2, \qquad (11\text{-}8)$$

где $c_1 = d\Theta/dx = \operatorname{grad}\Theta = \mathrm{const}$.

В этом случае имеет место линейное возрастание температуры.

При передаче тепла в одном направлении с постоянным значением величины p имеем:

$$\Theta = \frac{p}{2\lambda_x} x^2 + c_1 x + c_2, \qquad (11\text{-}9)$$

т. е. параболическое распределение температуры вдоль оси x.

Постоянные c_1 и c_2 определяются из граничных условий. На-

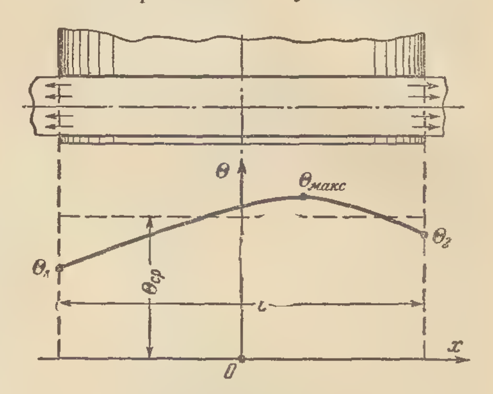


Рис. 11-1. Распределение температуры вдоль стержня обмотки в пазу.

пример, для стержня обмотки, уложенного в паз (рис. 11-1), уравнение распределения температуры вдоль стержня получит вид:

$$\frac{p}{2\lambda_x}\left[\left(\frac{l}{2}\right)^2 - x^2\right] + \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{l} x + \frac{\Theta_2 + \Theta_1}{2} = 0. \qquad (11\text{-}10)$$

При условии $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta_л$ на границе с лобовыми частями обмотки средняя температура будет равна:

$$\Theta_{ср} = \Theta_л + \frac{pl^2}{12\lambda_x}, \qquad (11\text{-}11)$$

а максимальная составит:

$$\Theta_{макс} = \Theta_л + \frac{pl^2}{8\lambda_x}. \qquad (11\text{-}12)$$

В случае двухмерного движения теплового потока задача становится весьма сложной и решается приближенно.

При неустановившемся режиме проблема теплового расчета становится еще более сложной. В первом приближении температура внутри объема отдельных тел, например сердечника, обмоток, и т. д., принимается постоянной и расчет приводится к определению температуры

двух-трех однородных тел, связанных тепловыми проводимостями или тепловыми сопротивлениями. В дальнейшем уточняются внутренние перепады температуры отдельных тел.

11-3. НАГРЕВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

Анализ нагревания однородного тела может быть использован как для установившихся, так и для неустановившихся тепловых процессов. Обозначим через Q количество тепла, выделяемое за единицу времени в однородном теле.

Очевидно, Q равно сумме потерь, возникающих в рассматриваемом однородном теле. В процессе нагревания тепло Q частично идет на повышение температуры тела, а частично рассейвается в окружающую среду. Обозначим через G вес тела (*кг*), через c удельную теплоемкость (*дж/кг·град*), через α коэффициент теплоотдачи поверхности нагреваемого тела, равный теплу, рассеиваемому в единицу времени в окружающее пространство с единицы площади поверхности при превышении ее температуры на 1° С, через S площадь поверхности, через Θ превышение температуры поверхности тела над температурой окружающей среды.

В общем случае передача тепла идет тремя путями: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Для практики с достаточной точностью можем считать, что тепло, рассеиваемое с поверхности тела, пропорционально превышению температуры поверхности [см. (11-2)]. При неизменных потерях Q, выделяемых в теле, дифференциальное уравнение нагревания, выражающее баланс энергии за время dt, будет иметь вид:

$$Qdt = cG\,d\Theta + \alpha S\Theta\,dt. \quad (11\text{-}13)$$

В установившемся режиме, когда достигнуто конечное превышение температуры тела Θ_∞ и $cGd\Theta = 0$, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду:

$$Qdt = \alpha S\Theta_\infty\,dt,$$

или

$$Q = \alpha S\Theta_\infty. \quad (11\text{-}14)$$

Общим решением уравнения (11-13) является

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_\infty - \Theta_0)(1 - e^{-t/\tau}), \quad (11\text{-}15)$$

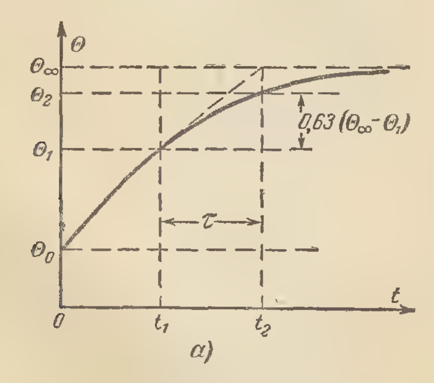
где Θ_0 — начальный перегрев тела;
τ — постоянная времени нагревания однородного тела:

$$\tau = \frac{cG}{\alpha S}. \quad (11\text{-}16)$$

При $\Theta_\infty > \Theta_0$ уравнение (11-15) отображает процесс нагревания, при $\Theta_\infty < \Theta_0$ — процесс охлаждения. Кривые нагревания и охлаждения представлены на рис. 11-2. Если в процессе нагревания $\Theta_0 = 0$, то уравнение (11-15) принимает вид:

$$\Theta = \Theta_\infty (1 - e^{-t/\tau}). \quad (11\text{-}15a)$$

Если при охлаждении конечная температура тела сравняется с тем-



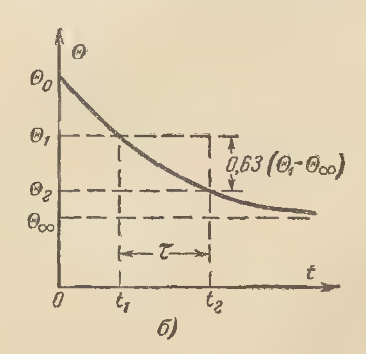


Рис. 11-2. Кривые нагревания (*а*) и охлаждения (*б*) однородного тела. $\tau = t_2 - t_1$ (t_2 при θ_2, t_1 при θ_1).

пературой охлаждающей среды, то $\Theta_\infty = 0$ и уравнение охлаждения представится по (11-15) в виде:

$$\Theta = \Theta_0 e^{-t/\tau}. \qquad (11\text{-}15б)$$

Теоретически конечное превышение температуры Θ_∞ достигается через бесконечно большое время. Однако практически можно считать (в пределах точности до 5%) температуру установившейся через время $t = (3 \div 4)\tau$. Согласно (11-14) ее значение составит:

$$\Theta_\infty = \frac{Q}{\alpha S}. \qquad (11\text{-}17)$$

Уравнение (11-15) позволяет рассчитать нагрев тела при любом неустановившемся тепловом режиме. Как видно из уравнения (11-15), для этого требуется знать установившееся превышение температуры Θ_∞, соответствующее длительному режиму работы, и постоянную времени нагревания τ.

11-4. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НАГРЕВА

Источниками выделения тепла в электрической машине являются обмотки, стальные части ее магнитной цепи и конструктивных элементов, в которых возникают потери от перемагничивания. Необходим учет нагрева скользящего контакта. Механические потери, включая вентиляционные, обычно имеют меньшее значение.

На пути движения тепловых потоков от источника тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, толще изоляции и между охлаждаемыми поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете определяются эти внутренние перепады температуры и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей электрической машины над температурой охлаждающего воздуха (газа) при воздушном (газовом) охлаждении. При непосредственном соприкосновении материала обмоток с охлаждающей средой, т. е. при непосредственном охлаждении проводников обмотки определяется превышение температуры металла обмотки над температурой охлаждающего газа или жидкости.

Перепадом температуры в толще металла обмотки и стальных сердечниках магнитной цепи часто пренебрегают, так как теплопроводность металлов в сотни раз больше теплопроводности изоляции (табл. 11-3).

В практических расчетах ограничиваются определением среднего перегрева обмоток, т. е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) в рассматриваемых объемах постоянна.

Для определения полного перегрева обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая в машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Рассмотрим расчет составляющих превышения температуры.

а). **Температурный перепад по толщине изоляции $\Theta_и$.** Обмотки электрических машин изолируются при укладке в пазы от пакетов (пазовая изоляция); изолируются также каждый проводник и группа проводников; в целом изоляционный слой получается достаточно толстым (например, в машинах на 10 *кв* — до 4—6 *мм*). При этом теплопроводность слоя изоляции не является однородной. В расчет принимают среднее значение теплопроводности, найденное опытным путем в зависимости от класса нагревостойкости (табл. 11-3), и перепад температуры по толщине слоя считают линейным согласно (11-8). В этом случае количество тепла Q, проходящее через изоляцию за 1 *сек* (тепловой поток), пропорционально перепаду температуры $\Theta_и$ по толщине изоляции, площади S изоляции в плоскости, перпендикулярной движению теплового потока, и теплопроводности λ изоляционного материала и обратно пропорционально толщине изоляционного слоя δ:

$$Q = \Theta_и \frac{\lambda S}{\delta}. \qquad (11\text{-}18)$$

Соответственно перепад установившейся температуры составит:

$$\Theta_и = Q \frac{\delta}{\lambda S}. \qquad (11\text{-}19)$$

Формула (11-19) имеет сходство с выражением закона Ома для электрической цепи.

Приняв тепловой поток Q за аналог электрического тока, а перепад температуры $\Theta_и$ на длине пути δ движения потока за аналог падения напряжения в электрической цепи, можем ввести понятие *теплового сопротивления* изоляционного слоя $R_и$, определяющего перепад температуры, аналогично электрическому сопротивлению, вызывающему соответствующее падение напряжения в цепи:

$$R_и = \frac{\delta}{\lambda S}. \qquad (11\text{-}20)$$

Таблица 11-3

Значения удельной теплопроводности

Название материала	λ, *вт/град·см*
Медь	$380\cdot10^{-2}$
Алюминий	$220\cdot10^{-2}$
Серебро	$420\cdot10^{-2}$
Сталь листовая электротехническая вдоль слоя:	
слабо легированная	$(48\div35)\cdot10^{-2}$
средне легированная	$(30\div26)\cdot10^{-2}$
сильно легированная	$(20\div19)\cdot10^{-2}$
Сталь листовая электротехническая поперек слоя:	
с бумажной изоляцией	$(1{,}2\div0{,}87)\cdot10^{-2}$
лакированная	$(4{,}4\div3{,}1)\cdot10^{-2}$
Лакоткань	$0{,}15\cdot10^{-2}$
Летероид	$0{,}23\cdot10^{-2}$
Электрокартон:	
сухой	$0{,}180\cdot10^{-2}$
пропитанный в масле	$0{,}250\cdot10^{-2}$
Миканит	$0{,}20\cdot10^{-2}$
Асбест	$0{,}19\cdot10^{-2}$
Эмаль, фарфор	$(1{,}50\div1{,}63)\cdot10^{-2}$
Стекло	$1{,}1\cdot10^{-2}$
Дерево поперек волокон	$0{,}11\cdot10^{-2}$
Гетинакс	$(0{,}226\div0{,}276)\cdot10^{-2}$
Воздух при 760 *мм рт. ст.* 40°С	$0{,}0266\cdot10^{-2}$
Водород при 40°С	$0{,}190\cdot10^{-2}$
Вода при 40°С	$0{,}633\cdot10^{-2}$
Трансформаторное масло при 40°С	$0{,}164\cdot10^{-2}$
Изоляция пазовая обмоток якоря машин постоянного тока и ротора асинхронных машин:	
классов А, Е	$0{,}10\cdot10^{-2}$
классов В, F, Н	$0{,}16\cdot10^{-2}$
То же, статорных обмоток асинхронных и синхронных машин:	
классов А, Е, В (некомпаундированная)	$0{,}10\cdot10^{-2}$
классов В (компаундированная), F, Н	$0{,}16\cdot10^{-2}$

Примечание. λ *вт/град·м*=100 λ *вт/град×см.*

Выразив в формуле (11-20) δ в сантиметрах, перепад температуры $\Theta_и$ в градусах Цельсия, S — поперечное сечение площади, через которую проходит тепловой поток, в квадратных сантиметрах и λ — удельную теплопроводность, являющуюся аналогом удельной электропроводности в электрической цепи, в *вт/см·град*, получим размерность теплового сопротивления в *град/вт*.

Значения теплопроводности для различных материалов приведены в табл. 11-3.

В многослойной изоляции суммарный перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Соответственно суммарное тепловое сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных слоев изоляции:

$$R_и = R_{и1} + R_{и2} + \dots + R_{иn},$$

где $R_{иn} = \delta_n/\lambda_n S_n$ — тепловое сопротивление n-го слоя.

Так как $S_1 = S_2 = \dots = S_n$, то

$$\delta/\lambda = \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n, \qquad (11\text{-}21)$$

где $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — толщины отдельных слоев изоляции; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — удельные теплопроводности изоляции соответствующих слоев; λ — эквивалентная удельная теплопроводность многослойной изоляции с общей толщиной δ.

Из (11-21) следует, что удельная теплопроводность многослойной изоляции составит

$$\lambda = \frac{\delta}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n}. \qquad (11\text{-}22)$$

Как видно из табл. 11-3, удельная теплопроводность тонких слоев воздуха крайне низка, составляя ~ 0,000266. Поэтому наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции может резко снизить результирующую теплопроводность такой изоляции, о чем говорилось выше.

Путем компаундировки в специальных вакуум-аппаратах стремятся вытеснить воздух из изоляции, в результате чего значительно улуч-

шается теплопроводность и электрическая прочность изоляции.

В практических тепловых расчетах для слоистой изоляции различной нагревостойкости принимают на основании опытных данных значения результирующей удельной теплопроводности, указанные в табл. 11-3.

б) **Теплопередача с поверхности.** Отвод тепла с поверхности нагретого тела происходит путем: 1) излучения в окружающее пространство (лучеиспусканием); 2) передачи тепла путем теплопроводности; 3) передачи его путем конвекции.

В чистом виде теплопередача путем излучения может иметь место, если нагретая поверхность находится в вакууме.

Теплопередача путем теплопроводности воздуха (или другого газа) настолько мала (табл. 11-3), что ее практически невозможно учесть.

Конвективная теплопередача обусловлена нагревом частиц воздуха, соприкасающихся с нагретой поверхностью электрической машины и вследствие этого совершающих восходящее движение; их место занимают более холодные частицы, которые в свою очередь нагреваются и движутся вверх. Конвективную теплопередачу сильно повышает принудительное увеличение скорости движения частиц (искусственный обдув нагретой поверхности).

По закону Стефана—Больцмана плотность теплового потока, т. е. тепла, излучаемого в 1 *сек* с 1 *см*² поверхности тела, равна:

$$q_{\text{из}}=\sigma\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4-\left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right],\ вт/см^2, \quad (11\text{-}23)$$

где T и T_0 — абсолютные температуры нагретой поверхности тела и окружающей среды, °К;

σ — коэффициент теплоизлучения поверхности, значения σ приведены в табл. 11-4.

Для удобства вычислений представим плотность теплового потока, излучаемого с поверхности в соответствии с (11-2), формулой

$$q_{\text{из}}=\alpha_{\text{из}}(T-T_0)=\alpha_{\text{из}}\Theta,\ вт/см^2, \quad (11\text{-}24)$$

Таблица 11-4

Коэффициенты излучения различных поверхностей

Теплоизолирующая поверхность	$\sigma\cdot10^4\ \frac{вт}{(град)^4\cdot см^2}$
Абсолютное черное тело	5,77
Слабо полированная медь	1,0
Поверхности гальванопокрытий	1,3—1,6
Чугун серый	5,5
Бумажная и волокнистая изоляция	5,2
Бумага, электрокартон	5
Пакеты стальных листов	5
Покрытая красками и лаками темных оттенков	5

где $\alpha_{\text{из}}$ — коэффициент теплоизлучения поверхности, *вт/см²·град*.

Из сопоставления (11-23) и (11-24) следует, что $\alpha_{\text{из}}$ зависит от Θ. Однако при температурах, встречающихся в электрических машинах, $\alpha_{\text{из}}$ изменяется незначительно. При среднем превышении температуры поверхности 40° С и температуре окружающего воздуха 20° С

$$\alpha_{\text{из}}\approx 6\cdot10^{-4}\ вт/град\cdot см^2. \quad (11\text{-}25)$$

Тогда тепловой поток, рассеиваемый путем теплоизлучения с поверхности, составит:

$$Q_{\text{из}}=\alpha_{\text{из}}S_{\text{из}}\Theta=6S_{\text{из}}\Theta\cdot10^{-4}\ вт, \quad (11\text{-}26)$$

где $S_{\text{из}}$ — поверхность излучения, *см²*.

Тепловой поток, рассеиваемый путем конвекции, в соответствии с (11-2) определяется коэффициентом конвективной теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$.

Для нагретой поверхности, находящейся в спокойном воздухе при тех же примерно условиях, которые приняты для излучаемой поверхности, обычно считают [Л. 18]

$$\alpha_{\text{к}}\approx 8\cdot10^{-4}\ вт/град\cdot см^2. \quad (11\text{-}27)$$

В среднем полный коэффициент теплопередачи может быть принят равным:

$$\alpha=\alpha_{\text{из}}+\alpha_{\text{к}}=(6+8)\cdot10^{-4}=$$

$$=14\cdot10^{-4}\ вт/град\cdot см^2. \quad (11\text{-}28)$$

В общем случае, полный теплосъем с поверхности в спокойном воздухе составит:

$$Q=(6S_{\text{из}}+8S_{\text{к}})\Theta\cdot10^{-4}\ вт. \quad (11\text{-}29)$$

Как правило $S_{из} \neq S_к$; обычно $S_{из} < S_к$.

Формула (11-29) может быть использована для определения перегрева Θ поверхности корпуса закрытых электрических машин без искусственного обдува, работающих в окружающем спокойном воздухе.

При искусственном обдуве коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ настолько возрастает, что можно практически пренебречь долей теплоизлучения и считать полный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha \approx \alpha_к. \qquad (11\text{-}30)$$

Коэффициенты теплоотдачи α определяются экспериментально на моделях и с целью использования их для конкретных случаев теплоотдачи поверхности выражаются с помощью безразмерных критериев подобия. Наиболее часто в тепловых расчетах электрических машин применяются следующие критерии:

1) Критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}. \qquad (11\text{-}31)$$

Критерий Нуссельта связывает коэффициент теплоотдачи α нагретой стенки канала с удельной теплопроводностью λ охлаждающей среды, движущейся относительно этой стенки.

Величина d в (11-31) является определяющим размером, характеризующим геометрию исследуемой поверхности.

Для поверхностей каналов с поперечным сечением произвольной формы определяющий размер принимается равным гидравлическому диаметру этого сечения

$$d = \frac{4S}{\Pi}, \qquad (11\text{-}32)$$

где S и Π — площадь и периметр поперечного сечения канала.

Для канала круглого сечения d является диаметром сечения.

При прямоугольном сечении со сторонами b и h гидравлический диаметр равен:

$$d = \frac{2bh}{b+h}; \qquad (11\text{-}32а)$$

для квадратного сечения ($b = h$)

$$d = b; \qquad (11\text{-}32б)$$

при узких прямоугольных каналах ($h \gg b$)

$$d \approx 2b. \qquad (11\text{-}32в)$$

Для охлаждаемых открытых поверхностей определяющий размер d принимается равным длине или высоте охлаждаемой поверхности.

2) Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu}. \qquad (11\text{-}33)$$

Критерий Рейнольдса определяет характер движения охлаждающей среды, обладающей кинематической вязкостью ν и движущейся со скоростью v.

Кинематическая вязкость ν характеризует внутреннее трение частиц охлаждающей среды, т. е. свойство последней оказывать сопротивление взаимному сдвигу смежных слоев частиц. Значение ν имеет размерность *см²/сек* (или *м²/сек*).

3) Критерий Прандтля определяет свойства охлаждающей среды:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \qquad (11\text{-}34)$$

где a — температуропроводность:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \ см^2/сек; \qquad (11\text{-}35)$$

c_p — удельная теплоемкость окружающей среды (жидкости, газа) при постоянном давлении, *дж/град·кг*;

ρ — плотность окружающей среды, *кг/см³*.

Физические параметры наиболее часто применяемой в электромашиностроении охлаждающей среды — воздуха даны в табл. 11-5; там же приведены данные для воды.

Для стенки, обдуваемой воздухом вдоль ее длины l, критериальное уравнение теплообмена имеет вид [Л. 81]:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = 0{,}594\, Re^{0{,}5}, \qquad (11\text{-}36)$$

которое пригодно для $Re = \frac{vl}{\nu} < 1{,}5 \cdot 10^5$, соответствующего ламинарному течению частиц воздуха,

Таблица 11-5

Физические параметры сухого воздуха (при $p=1$ *ат*) и воды

Параметр	Значения параметра для воздуха/воды при температуре, °C							
	0	10	20	30	40	50	60	70
λ, *вт/град·м*	0,0238/0,559	0,0245/0,557	0,0252/0,597	0,0258/0,615	0,0266/0,633	0,0272/0,647	0,02795/0,659	0,0286/0,669
ρ, *кг/м³*	1,252/999,9	1,206/999,7	1,164/998,2	1,127/995,7	1,092/992,2	1,057/988,1	1,020/983,2	0,996/977,8
$\nu\cdot10^8$, *м²/сек*	1 396/179,4	1 482/129,7	1 568/99,6	1 660/79,6	1 752/66,3	1 847/56,2	1 943/98,0	2 045/41,3
c_p, *дж/град·кг*	1 010/4 230	1 010/4 210	1 015/4 180	1 015/4 180	1 020/4 180	1 020/4 180	1 020/4 180	1 020/4 190
$a\cdot10^8$, *м²/сек*	1 878/13,2	2 010/13,77	2 123/14,30	2 260/14,80	2 394/15,29	2 535/15,68	2 678/16,04	2 827/16,33

Примечание. Значения величин в числителе относятся к воздуху, в знаменателе — к воде.

когда они движутся, не перемешиваясь, параллельно нагретой стенке.

При турбулентном течении направления и скорости частиц непрерывно изменяются; в этом случае значение $Re>5\cdot10^5$ и критериальное уравнение видоизменяется:

$$Nu=0{,}0432\,Re^{0{,}78}. \quad (11\text{-}37)$$

Из (11-36) и (11-37) находится коэффициент теплоотдачи поверхности нагретой стенки:

для ламинарного течения

$$\alpha=0{,}594\lambda l^{-0{,}5}\left(\frac{v}{\nu}\right)^{0{,}5}\cdot10^{-4}, \quad (11\text{-}38)$$

для турбулентного течения

$$\alpha=0{,}0432\,\lambda l^{-0{,}22}\left(\frac{v}{\nu}\right)^{0{,}78}\cdot10^{-4}. \quad (11\text{-}39)$$

Значения λ и ν берутся из табл. 11-5 для средней температуры воздуха, равной:

$$\vartheta_{ср}=\frac{\vartheta_х+\vartheta_г}{2}, \quad (11\text{-}40)$$

где $\vartheta_х$, $\vartheta_г$ — температуры холодного и соответственно нагретого воздуха.

При $\vartheta_{ср}=20°$ С и атмосферном давлении $p=1$ *ат* по (11-39) получим:

$$\alpha=6l^{-0{,}22}v^{0{,}78}\cdot10^{-4}\,вт/град\cdot см^2, \quad (11\text{-}41)$$

где l — длина стенки вдоль движения воздуха, *м*;

v — скорость воздуха, *м/сек*.

При движении воздуха перпендикулярно плоскости стенки коэффициент теплоотдачи α значительно возрастает и составляет по [Л. 14]:

$$\alpha=10^{-3}(1+0{,}54\,v^2),\ вт/град\cdot см^2. \quad (11\text{-}42)$$

Формулу (11-42) можно применять при расчете теплоотдачи лобовых частей статорных обмоток.

При принудительном движении охлаждающей среды в канале и ламинарном течении критерий $Re<2\,300$, при турбулентном течении $Re>10\,000$. В последнем случае критериальное уравнение теплообмена имеет вид [Л. 81]:

$$Nu=0{,}032\,Re^{0{,}8}\,Pr^n\left(\frac{l}{d}\right)^{-0{,}054}, \quad (11\text{-}43)$$

где l, d — длина и гидравлический диаметр канала;

$n = 0{,}3$ при охлаждении стенки канала;

$n = 0{,}37$ при ее нагревании.

В электрических машинах отношение l/d для аксиальных каналов составляет 10—15, что в среднем дает $(l/d)^{-0{,}054} \approx 0{,}88$. С учетом этого для случая охлаждения имеем по (11-43):

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0{,}028\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}3}. \qquad (11\text{-}44)$$

При турбулентном течении охлаждающей среды и $\mathrm{Re} > 10^4$ большее приближение к опыту дает уравнение [Л. 81]

$$\mathrm{Nu} = 0{,}027\,(\mathrm{Re\,Pr})^{0{,}78}. \qquad (11\text{-}45)$$

Учитывая (11-33) и (11-34), находим коэффициент теплоотдачи для стенки канала:

$$\alpha = 0{,}027\,\lambda a^{-0{,}78}\,d^{-0{,}22}\,v^{0{,}78}\cdot 10^{-4} =$$

$$= Md^{0{,}22}\,v^{0{,}78},\ \text{вт/град}\cdot\text{см}^2, \qquad (11\text{-}46)$$

где $M = 2{,}7\,\lambda a^{-0{,}78}\cdot 10^{-6}$.

Для воздушного охлаждения коэффициент M дан в табл. 11-6 в функции расчетной температуры ϑ:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_c + \vartheta_x}{2}, \qquad (11\text{-}47)$$

где ϑ_c — температура стенки канала, °C;

ϑ_x — температура холодного воздуха, входящего в канал, °C.

Таблица 11-6

Значения коэффициента $M = 0{,}027\lambda a^{-0{,}78}\cdot 10^{-4}$ для воздуха

$\vartheta_{расч}$, °C	40	50	60	70
M	2,89	2,82	2,78	2,74

Формула (11-46) пригодна для каналов с произвольной формой поперечного сечения. Хорошее совпадение с опытом дает формула [Л. 18]

$$\alpha = 3{,}6\,d^{-0{,}2}\,v^{0{,}8}\times$$

$$\times\,10^{-4}\ \text{вт/град}\cdot\text{см}^2, \qquad (11\text{-}46а)$$

где d — диаметр, *м*; v — скорость, *м/сек*.

Для радиальных каналов статора при воздушном охлаждении и средней скорости воздуха в них $v_{ср} \geqslant 5$ *м/сек* значения α можно заимствовать из рис. 11-3 по [Л. 14]. Номера кривых определяются на вспомогательной таблице к рис. 11-3

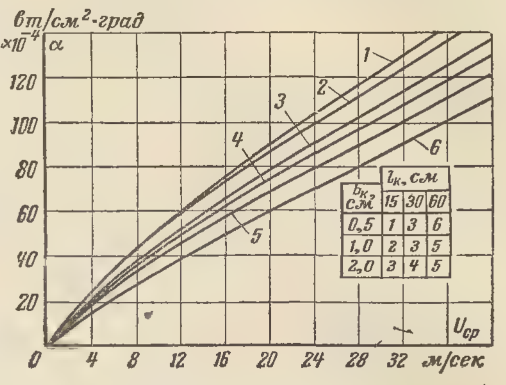


Рис. 11-3. Коэффициенты теплоотдачи α радиальных каналов. Кривые *1, 2, 3, 4, 5, 6* соответствуют различным значениям длины и ширины каналов.

по заданным значениям ширины $b_к$ и длины $l_к$ канала. Средняя скорость воздуха $v_{ср}$ приведена на рис. 11-4 в процентах окружной скорости ротора $v_{рот}$ в функции отношения l/τ,

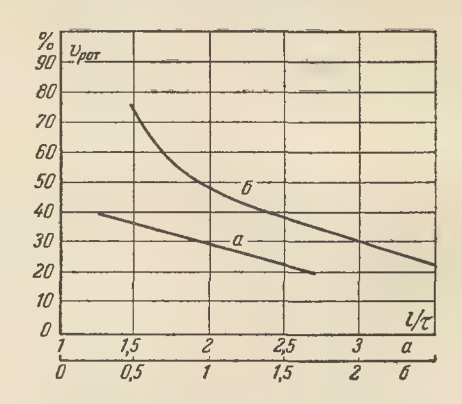


Рис. 11-4. Средняя скорость воздуха в процентах окружной скорости ротора.

а — в вентиляционных каналах асинхронных машин; *б* — в вентиляционных каналах явнополюсных машин.

где l — аксиальная длина ротора; τ — полюсное деление. Коэффициенты теплоотдачи для полюсных катушек синхронных машин приводятся в гл. 14.

Для якоря и катушек возбуждения машины постоянного тока ко-

эффициент теплоотдачи приближенно определяется по формуле

$$\alpha \approx 1{,}4 \cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}8\sqrt{v_a}\right),\ вт/град \cdot см^2, \quad (11\text{-}48)$$

где v_a — окружная скорость якоря, *м/сек*.

Коэффициент теплоотдачи внешней поверхности коллектора и контактных колец определяется по эмпирической формуле

$$\alpha_к = 5 \cdot 10^{-3}\left(1 + k\sqrt{v_к}\right),\ вт/град \cdot см^2, \quad (11\text{-}49)$$

где $v_к$ — окружная скорость коллектора, *м/сек*;

k — опытный коэффициент; для нормальных условий вентиляции $k=0{,}7$; при усиленном обдуве внешней поверхности и наличии вентиляционных каналов в коллекторной втулке $k=1 \div 1{,}3$.

Для различных нагретых поверхностей в электрических машинах, находящихся в спокойном воздухе, значения коэффициентов теплоотдачи приведены в табл. 11-7.

Таблица 11-7

Значения коэффициента α_0 для нагретых поверхностей в спокойном воздухе

Характеристика поверхности	α_0, *вт/град·см²*
Чугунная или стальная поверхность, ошпаклеванная и покрытая лаком (станины и подшипниковые щиты электрических машин)	$1{,}42 \cdot 10^{-3}$
Чугунная или стальная поверхность, не ошпаклеванная, но покрытая лаком	$1{,}67 \cdot 10^{-3}$
Лакированная медная поверхность	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$

Примечание. α_0 *вт/град · м²* $= 10^4$ α_0 *вт/град · см²*.

При обдуве нагретой поверхности со скоростью воздуха 5—25 *м/сек* коэффициент теплоотдачи, взятый из табл. 11-7, следует увеличить:

$$\alpha = \alpha_0(1 + k_0 v_в), \quad (11\text{-}50)$$

где $v_в$ — скорость воздуха, *м/сек*:

$$v_в \approx \frac{V_в}{S_в}. \quad (11\text{-}51)$$

Здесь: $V_в$ — количество воздуха, обдувающего нагретую поверхность, *м³/сек*;

$S_в$ — поперечное сечение вентиляционного канала около нагретой поверхности, *м²*;

k_0 — коэффициент, учитывающий эффективность обдува.

Для внешней поверхности ротора электрической машины $k_0=0{,}1$; для поверхности лобовых частей статорных обмоток $k_0=0{,}07 \div 0{,}05$; при этом для роторов и их обмоток принимается равным

$$v_в = \sqrt{v_a^2 + (v_в')^2},$$

где v_a — окружная скорость ротора;

$v_в'$ — аксиальная скорость воздуха, обдувающего ротор, найденная из вентиляционного расчета (см. гл. 10) и формулы (11-51).

В закрытых машинах для улучшения охлаждения выполняют внешнюю поверхность корпуса статора ребристой. Ребра располагают вдоль предполагаемого направления движения потока охлаждающего воздуха.

Тепловой поток, отводимый с оребренной поверхности корпуса, состоит из части, рассеиваемой с поверхности S_c корпуса, включающей промежутки c между ребрами (рис. 11-5), и части, рассеиваемой поверхностью ребер $S_р$:

$$Q = (\alpha S_c + \alpha_р S_р)\,\Theta = \alpha k_р S \Theta, \quad (11\text{-}52)$$

где $k_р$ — коэффициент, учитывающий повышение теплоотдачи оребренного корпуса; решив (11-52), получим:

$$k_р = \frac{c}{b+c} + \frac{\alpha_р}{\alpha} \cdot \frac{b}{b+c}. \quad (11\text{-}53)$$

Здесь: α — коэффициент теплоотдачи гладкого корпуса, *вт/град · см²*;

$\alpha_р$ — коэффициент теплоотдачи ребер, приведенный к поверхности b цилиндрической части корпуса (рис. 11-5) и превышению θ температуры корпуса над температурой охлаждающего воздуха;

$S = S_c + S_р$ — поверхность гладкого корпуса (неоребренного).

Согласно [Л. 81] значение

$$\alpha_р = \beta\lambda\,\mathrm{th}(\beta h),\ вт/град \cdot см^2, \quad (11\text{-}54)$$

где

$$\beta=\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda b}}, \quad см^{-1}; \qquad (11\text{-}55)$$

λ — удельная теплопроводность материала ребер, *вт/град · см*;
b и h — размеры основания ребра и высота ребра, *см*

Теплорассеивающую поверхность ребер можно увеличить за счет увеличения их ко-

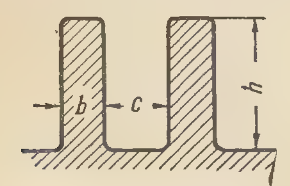


Рис. 11-5. Ребра наружной поверхности корпуса.

личества и высоты h. Но теплоотдача растет не пропорционально числу ребер. При близком расположении ребер воздух между ними подогревается, уменьшая этим их теплорассеяние. Теплоотдачу также ухудшает взаимный подогрев ребер вследствие теплоизлучения. Поэтому расстояние c между ребрами должно быть достаточным, чтобы избежать этого влияния. Согласно [Л. 18] при аксиальной длине ребер (корпуса) от 0,2 до 1 *м* и скорости охлаждающего воздуха от 1 до 8 *м/сек* рекомендуется

$$c=1{,}5\div 2{,}0 \text{ см}$$

Кроме взаимного влияния ребер, при увеличении их числа возрастает аэродинамическое сопротивление для потока охлаждающего воздуха. Он начинает отклоняться от поверхности корпуса. При открытых ребрах это отклонение возрастает с длиной ребер и плотностью их установки. Можно уменьшить отклонение струй потока воздуха увеличением высоты ребер и частичным экранированием их специальным направляющим кожухом (примерно на $^1/_4$—$^1/_3$ их длины со стороны входа воздуха).

При наиболее часто применяемых центробежных вентиляторах из-за отклонения струй охлаждающего воздуха только 40—60% воздушного потока охлаждает ребра.

При сильном обдуве нецелесообразно применение высоких ребер, так как эффективность теплоотдачи внешней кромки ребер уменьшается из-за понижения ее температуры.

При малых значениях α нецелесообразно брать большую толщину ребер [Л. 18]. При больших значениях α, что имеет место в крупных машинах, выгодно применять относительно толстые ребра. Толщина b стальных ребер лежит в пределах 3—12 *мм*, чугунных $\geqslant 5$ *мм*, из алюминиевого литья $\geqslant 3$ *мм*.

Так как с повышением удельной теплопроводности λ материала ребер теплоперепад между основанием ребра и наружной его кромкой уменьшается, то в этом случае целесообразно выбирать высокие ребра (например, при алюминиевом литье).

Установившийся перегрев Θ_α поверхности над температурой охлаждающей среды определяется по значению теплового потока Q_α, соответствующего потерям, рассеиваемым через поверхность охлаждения S_α, и коэффициенту теплоотдачи α, найденному тем или другим способом:

$$\Theta_\alpha=\frac{Q_\alpha}{\alpha S_\alpha}. \qquad (11\text{-}56)$$

Для теплового расчета с помощью тепловых схем замещения вводят понятие теплового сопротивления R_α между нагретой поверхностью и охлаждающей средой аналогично (11-20). На основании (11-56) получаем:

$$R_\alpha=\frac{\Theta_\alpha}{Q_\alpha}=\frac{1}{\alpha S_\alpha}, \text{ град/вт}. \qquad (11\text{-}57)$$

При определении установившейся температуры рассматриваемой части машины необходимо учесть подогрев воздуха, обдувающего поверхность.

Полный подогрев охлаждающего воздуха составляет (см. гл. 10):

$$\Theta_в=\frac{Q_\alpha}{c_в V_в}. \qquad (11\text{-}58)$$

Принимая линейный характер изменения подогрева воздуха вдоль пути его движения, считаем, что средний его подогрев равен примерно 0,5 $\Theta_в$ над температурой входящего холодного воздуха $\vartheta_х$.

В итоге средняя установившаяся температура обмотки электрической машины включает перепад температуры в изоляции $\Theta_и$, перегрев охлаждаемой поверхности Θ_α и средний подогрев воздуха:

$$\vartheta=\Theta_и+\Theta_\alpha+0{,}5\,\Theta_в+\vartheta_х. \qquad (11\text{-}59)$$

11-5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Метод тепловых схем замещения, использующих понятия $R_и$ и R_α и решаемых по правилам электрических цепей, получил в расчетах

электрических машин широкое распространение. При этом параллельное сложение тепловых сопротивлений применяют для решения не только двухмерных, но и трехмерных задач, когда суммируются тепловые сопротивления по трем направлениям тепловых потоков.

Применение тепловых схем замещения дает возможность определять средние температуры частей электрической машины, принимаемых за однородные тела.

Для каждой части тепловой схемы справедливо основное уравнение вытекающее из (11-56) или (11-19):

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = Q_{12} R_{12}, \qquad (11\text{-}60)$$

где Q_{12} — тепловой поток между точками *1* и *2* схемы, представляющими 1-ю и 2-ю части машины, *вт*;

ϑ_1, ϑ_2 — средние температуры этих частей, °С;

R_{12} — тепловое сопротивление между точками *1* и *2* схемы, *град/вт*.

Естественно, что чем большее число эквивалентных элементов может быть предложено для замены отдельных частей электрической машины, тем точнее окажется расчет. Однако усложнение тепловой схемы, а следовательно, и расчета должно сообразоваться с достижимой точностью расчета при имеющейся неопределенности исходных данных.

На примере статора машины переменного тока рассмотрим построение тепловой схемы замещения. Разбиваем статор на три условно однородные в тепловом отношении тела, являющиеся источниками тепла: 1) пазовая часть обмотки статора с потерями $P_а$, 2) две стороны лобовых частей с суммарными потерями $P_л$ и 3) стальной сердечник статора с потерями $P_с$.

Каждая часть создает тепловые потоки. Считая в общем случае, что условия охлаждения рассматриваемых частей машины различны, принимаем четыре пути рассеивания тепла (рис. 11-6,*а*): $Q_и$ — тепловой поток к стенкам зубцов сердечника с перепадом температуры в тепловом сопротивлении пазовой изоляции $R_и$; $Q_в$ — тепловой поток к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах через тепловое сопротивление $R_в$; $Q'_{пр}$ и $Q''_{пр}$ — тепловые потоки от пазовой части об-

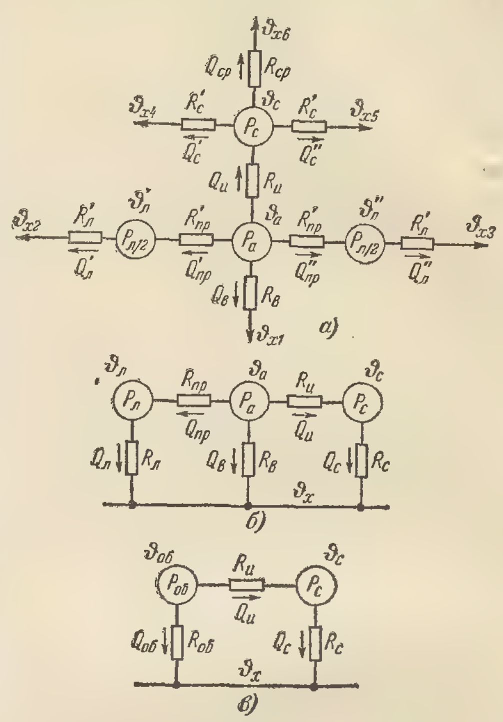


Рис. 11-6. Тепловая схема замещения статора машины переменного тока.

а — при различных температурах воздуха у теплорассеивающих поверхностей; *б* — при одинаковой температуре охлаждающего воздуха; *в* — упрощенная схема при $R_{пр}=0$.

мотки с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_{пр}$ вдоль проводников обмотки. Лобовые части обмотки рассеивают со своих поверхностей тепловые потоки $Q'_л$ и $Q''_л$ с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_л$. Поверхности сердечника статора рассеивают тепловые потоки $Q'_с$ и $Q''_с$ с боковых сторон пакетов с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_с$ и поток $Q_{ср}$ в радиальном направлении с наружной поверхности спинки статора и внутренней поверхности расточки статора.

В случае одинаковой температуры охлаждающего воздуха у тепло-

рассеивающих поверхностей тепловой расчет можно вести по схеме замещения на рис. 11-6,*б*. В этом случае тепловые сопротивления $R_{пр}$ и $R_{л}$ представляют собой параллельно соединенные сопротивления $R'_{пр}$ и соответственно $R'_{л}$:

$$R_{пр}=R'_{пр}/2;\ R_{л}=R'_{л}/2, \quad (11\text{-}61)$$

а сопротивление $R_{с}$ — параллельно соединенные сопротивления $R'_{с}$ и $R_{ср}$:

$$R_{с}=\frac{1}{1/R_{сп}+1/R_{ср}}, \quad (11\text{-}62)$$

где $R_{сп}=R'_{с}/2$.

В схеме на рис. 11-6, *б* имеется восемь неизвестных: $\vartheta_{а}$, $\vartheta_{л}$ и $\vartheta_{с}$ — средние температуры пазовой части обмотки, лобовых частей и сердечника статора; $Q_{и}$, $Q_{пр}$, $Q_{в}$, $Q_{л}$ и $Q_{с}$ — тепловые потоки, упомянутые выше. Для определения этих неизвестных составим в соответствии с рис. 11-6,*б* следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned}
&P_{а}+P_{л}+P_{с}=Q_{л}+Q_{в}+Q_{с};\\
&Q_{л}=P_{л}+Q_{пр};\\
&Q_{с}=Q_{и}+P_{с};\\
&\vartheta_{а}-\vartheta_{х}=Q_{в}R_{в};\\
&\vartheta_{л}-\vartheta_{х}=Q_{л}R_{л};\\
&\vartheta_{с}-\vartheta_{х}=Q_{с}R_{с};\\
&\vartheta_{а}-\vartheta_{л}=Q_{пр}R_{пр};\\
&\vartheta_{а}-\vartheta_{с}=Q_{и}R_{и},
\end{aligned}\right\} \quad (11\text{-}63)$$

В результате совместного решения их находим средние температуры отдельных частей статора, равные перегревам, если $\vartheta_{х}=0$:

$$\vartheta_{а}=\frac{R_{пр}R_{в}R_{и}\left[P_{л}\left(1+\frac{R_{и}}{R_{с}}\right)+P_{с}\left(1+\frac{R_{пр}}{R_{л}}\right)+P_{а}\left(1+\frac{R_{пр}}{R_{л}}\right)\left(1+\frac{R_{и}}{R_{с}}\right)\right]}{(R_{в}R_{и}+R_{в}R_{пр}+R_{пр}R_{и})\left(1+\frac{R_{пр}}{R_{л}}\right)\left(1+\frac{R_{и}}{R_{с}}\right)-R_{в}R_{и}\left(1+\frac{R_{и}}{R_{с}}\right)-R_{пр}R_{в}\left(1+\frac{R_{и}}{R_{в}}\right)}; \quad (11\text{-}64а)$$

$$\vartheta_{л}=\frac{P_{л}R_{пр}+\vartheta_{а}}{1+R_{пр}/R_{л}}; \quad (11\text{-}64б)$$

$$\vartheta_{с}=\frac{P_{с}R_{и}+\vartheta_{л}}{1+R_{и}/R_{с}}. \quad (11\text{-}64в)$$

Если принять $R_{пр}=0$, то значения температур несколько уменьшатся. Однако практически в нормальных машинах это снижение невелико из-за малости $R_{пр}$. Тепловая схема при $R_{пр}=0$ и решение ее значительно упрощаются. Упрощенная схема приведена на рис. 11-6,*в*. В ней $P_{об}=P_{а}+P_{л}$ и сопротивление

$$R_{об}=\frac{R_{л}R_{в}}{R_{л}+R_{в}}. \quad (11\text{-}65)$$

Из схемы рис. 11-6, *в* находим средние значения температуры обмотки и сердечника статора:

$$\vartheta_{об}=\frac{[P_{об}(1+R_{и}/R_{с})+P_{с}]R_{с}}{1+R_{и}/R_{об}+R_{с}/R_{об}}; \quad (11\text{-}66а)$$

$$\vartheta_{с}=\frac{P_{с}R_{и}+\vartheta_{об}}{1+R_{и}/R_{с}}. \quad (11\text{-}66б)$$

Тепловые схемы на рис. 11-6 могут быть использованы и для синхронных явнополюсных машин защищенного исполнения. Тепловые сопротивления этих схем рассчитываются по следующим формулам:

1. **Тепловое сопротивление пазовой изоляции**

$$R_{и}=\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}S_{и}}. \quad (11\text{-}67)$$

Здесь: $\delta_{и}$ — толщина пазовой изоляции, *см*;
$\lambda_{и}$ — удельная теплопроводность изоляции по табл. 11-3;
$S_{и}$ — площадь изоляции:

$$S_{и}=Z\Pi l_{ст}=Z\Pi(n_{в}+1)l', \ см^2, \quad (11\text{-}68)$$

где Z — число пазов статора;
Π — периметр паза:

$$\Pi=2(b_{п}+h_{п}-h_{к}), \ см \quad (11\text{-}68а)$$

($b_{п}$ и $h_{п}$ — ширина и высота паза;
$h_{к}$ — высота клина);
$n_{в}$ — число радиальных вентиляционных каналов;
l' — аксиальная длина пакета сердечника, *см*.

2. **Тепловое сопротивление лобовой части обмотки**

$$R_{л}=\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}S_{л}}+\frac{1}{\alpha_{л}S_{л}}. \quad (11\text{-}69)$$

Здесь: $\delta_{и}$ — толщина изоляции катушки, *см*;
$\lambda_{и}$ — из табл. 11-3;
$\alpha_{л}$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности изоляции по (11-42);

$S_л$ — площадь теплоотдачи лобовых частей:

для однослойных обмоток

$$S_л = Z\,\Pi_к\,l_л; \qquad (11\text{-}70а)$$

для двухслойных обмоток

$$S_л = 2Z\,\Pi_к\,l_л, \qquad (11\text{-}70б)$$

где Z — число пазов статора;

$\Pi_к$ — периметр катушки, *см*;

$l_л$ — длина лобовой части, *см*.

3. **Тепловое сопротивление металла всех стержней обмотки** по длине проводника с учетом (11-11)

$$R_{пр} = \frac{l_1 + l_л}{12\,Z\,N_п\,s_п\,\lambda} = R'_{пр}/2, \qquad (11\text{-}71)$$

где Z — число пазов;

$N_п$ — число проводников в пазу;

$s_п$ — сечение одного проводника, *см*²;

λ — удельная теплопроводность металла проводника: для меди $\lambda = 3{,}8$ *вт/град · см*; для алюминия $\lambda = 2{,}2$ *вт/град · см* (см. также табл. 11-3).

4. **Тепловое сопротивление от обмотки к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах**

$$R_в = \frac{\delta_и}{\lambda_и\,S_в} + \frac{1}{\alpha_в\,S_в}. \qquad (11\text{-}72)$$

Здесь: $\delta_и$ и $\lambda_и$ — соответственно толщина пазовой изоляции, *см*, и теплопроводность последней по табл. 11-3;

$S_в$ — площадь теплопередачи поверхности обмотки в радиальных каналах:

$$S_в = Z\,\Pi\,b_в\,n_в,\ см^2, \qquad (11\text{-}73)$$

где $b_в$ — ширина радиального канала (обычно 1 *см*);

$\alpha_в$ — коэффициент теплоотдачи по рис. 11-3 и 11-4; остальные обозначения см. (11-68).

5. **Тепловое сопротивление $R_с$ от сердечника статора (ротора) к охлаждающему воздуху.** Теплоотдача от сердечника происходит по различным путям в зависимости от системы вентиляции.

В продуваемых машинах с радиальной вентиляцией тепловой поток рассеивается преимущественно боковыми поверхностями. На своем пути он встречает одно тепловое сопротивление, обусловленное перепадом температур между поверхностью и охлаждающим воздухом, и другое при движении потока поперек слоя листов электротехнической стали пакета к боковым его поверхностям.

Тепловое сопротивление R_{cq} в поперечном направлении пакетов к охлаждающему воздуху составит с учетом (11-12):

$$R_{cq} = \frac{1}{\alpha_q\,S_q} + \frac{l'}{6\lambda_q\,S_q}, \qquad (11\text{-}74)$$

где α_q — коэффициент теплоотдачи в радиальных вентиляционных каналах по (11-46а) или из рис. 11-3;

S_q — боковая теплорассеивающая поверхность всех пакетов:

$$S_q = \pi(D_{нар} - h_{яр})\,h_{яр}(n_в + 1),\ см^2; \qquad (11\text{-}75)$$

$D_{нар}$ — наружный диаметр статора, *см*;

$h_{яр}$ — высота ярма статора, *см*;

l' — длина пакета статора, *см*;

λ_q — удельная теплопроводность электротехнической стали поперек слоя листов из табл. 11-3.

Рассеивается тепло сердечника и с цилиндрических его поверхностей.

Теплоотдача с внешней поверхности сердечника при радиальной вентиляции обычно невелика вследствие малой скорости движения воздуха около этой поверхности. Теплоотдача с внутренней его поверхности к ротору через воздушный зазор может быть достаточно большой при малой величине последнего, что имеет место в асинхронных машинах. При большом воздушном зазоре, например в синхронных машинах и машинах постоянного тока, теплоотдача происходит в струю воздуха, проходящего через воздушный зазор.

В соответствии с указанными путями движения тепловых потоков (рис. 11-6,*а*) в машине с радиальной вентиляцией получаем:

$$R_{с.р} = \frac{1}{1/R_{нар} + 1/R_{вн}} = \frac{1}{\alpha_{нар} S_{нар} + \alpha_{вн} S_{вн}}, \quad (11\text{-}76)$$

где $\alpha_{нар}$ — коэффициент теплоотдачи внешней (наружной) поверхности пакетов сердечника при согласно-радиальной вентиляции (направление струй воздуха от центра к периферии статора):

$\alpha_{нар} = 0{,}0014 \div 0{,}002$ *вт/град · см²* [Л. 18];

здесь: $S_{нар}$ — внешняя (наружная) поверхность пакетов сердечника:

$$S_{нар} = \pi D_{нар} l' (n_в + 1), \ см^2; \quad (11\text{-}77)$$

l' — аксиальная длина одного пакета сердечника, *см*;

$\alpha_{вн}$ — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности пакетов сердечника: при большом зазоре по (11-46а), при малом зазоре $\alpha_{вн} = \alpha_\delta$.

Значение α_δ зависит от величины воздушного зазора δ и шероховатости теплорассеивающих поверхностей, определяемой технологическим допуском e обработки. Значения e для поверхностей ротора и статора различны; в среднем $e = 0{,}08 \div 0{,}1$ *мм*. α_δ определяется по значению критерия Нуссельта [Л. 18]:

$$\mathrm{Nu} = \frac{0{,}212 f \,\mathrm{Re}}{1 - \frac{3{,}81}{f \,\mathrm{Re}}}, \quad (11\text{-}78)$$

где f — коэффициент шероховатости поверхности:

$$f = \frac{1}{4\,[1{,}11 + 2 \log \delta/e]^2}; \quad (11\text{-}78а)$$

Re — критерий Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{v\delta}{\nu};$$

δ — величина воздушного зазора, *м*;

v — окружная скорость ротора, *м/сек*;

$\nu = 2 \cdot 10^{-5}$ *м²/сек* — кинематическая вязкость воздуха (см. табл. 11-5).

Из значения критерия Нуссельта (11-78) определяется по (11-31):

$$\alpha_\delta = [\mathrm{Nu}] \frac{\lambda}{2\delta}, \ вт/град \cdot см^2; \quad (11\text{-}79)$$

где $\lambda = 0{,}00026$ *вт/град · см* — удельная теплопроводность воздуха (см. табл. 11-3);

$d = 2\delta$ — удвоенный воздушный зазор, *см*.

По значениям (11-74) и (11-76) определяется полное тепловое сопротивление $R_с$ при радиальной вентиляции:

$$R_с = \frac{1}{1/R_{сq} + 1/R_{ср}}. \quad (11\text{-}80)$$

В машинах с аксиальной вентиляцией тепловой поток передается в общем случае тремя параллельными путями: через аксиальные вентиляционные каналы, расположенные внутри сердечника, и от наружной и внутренней цилиндрических поверхностей пакетов статора:

$$R_с = \frac{1}{1/R_{кан} + 1/R_{нар} + 1/R_{вн}} = \frac{1}{\alpha_{кан} S_{кан} + \alpha_{нар} S_{нар} + \alpha_{вн} S_{вн}}, \quad (11\text{-}81)$$

где $\alpha_{кан}$ берется по (11-46) или (11-46а);

$$S_{кан} = n_{кан} \pi d_{кан} l, \ см^2; \quad (11\text{-}81а)$$

здесь: $n_{кан}$ — число аксиальных каналов;

$d_{кан}$ — диаметр канала, *см*;

$\alpha_{нар}$ — берется по (11-46) или (11-46а);

$\alpha_{вн}$ — для синхронных машин берется по (11-46) или (11-46а), для асинхронных—по (11-79);

$S_{нар}$ — берется по (11-77);

$S_{вн} = S_{нар} \frac{D}{D_{нар}}$ (D — диаметр расточки статора). (11-81б)

Тепловая схема замещения, оценивающая взаимное тепловое влияние ротора и статора асинхронной машины, приведена на рис. 11-7. Обозначения на схеме приняты применительно к рис. 11-6. Индекс *1* относится к статору, индекс *2* — к ротору.

Тепловая связь статора и ротора представлена тепловым сопротивлением воздушного зазора

$$R_\delta = \frac{1}{\alpha_\delta S_\delta}, \qquad (11\text{-}82)$$

где α_δ — берется по (11-79);

S_δ — теплопередающая поверхность воздушного зазора, *см*².

Тепловые сопротивления схемы на рис. 11-7 определяются по формулам для схемы на рис. 11-6; из сопротивления $R_{c(1)}$ и $R_{c(2)}$ величина R_δ исключена.

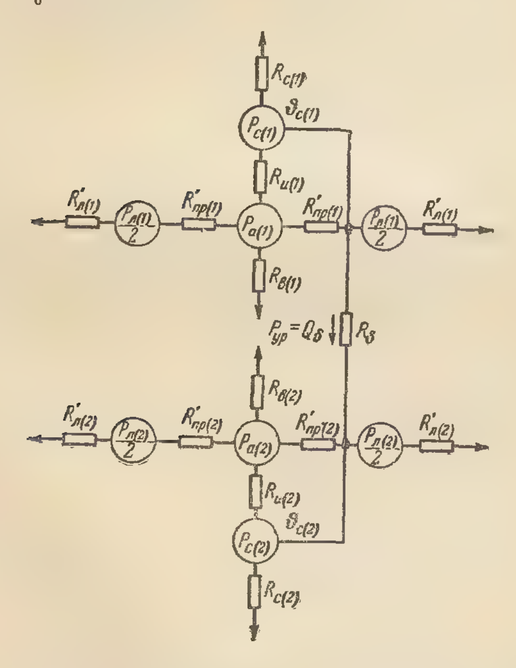


Рис. 11-7. Полная тепловая схема замещения асинхронной машины. Индекс 1 относится к статору, индекс 2 — к ротору.

При 14 неизвестных, определяемых 14 уравнениями для схемы на рис. 11-7, крайне затрудняются вычисления, особенно при ручном счете. Применение электронных вычислительных машин или специальных расчетных столов не всегда целесообразно. Поэтому рекомендуется итерационный метод расчета, согласно которому первоначально принимают $R_\delta = \infty$ и определяют превышения температур для статора и ротора раздельно. Если между температурами сердечников статора и ротора $\vartheta_{c(1)}$ и $\vartheta_{c(2)}$ оказывается большая разница, то находят уравнительный тепловой поток

$$P_{ур} = \frac{\vartheta_{c(1)} - \vartheta_{c(2)}}{R_\delta}$$

и соответственно понижают $P_{c(1)}$ и повышают $P_{c(2)}$ на $P_{ур}$. Затем производят второй расчет, в результате которого разность $\vartheta_{c(1)} - \vartheta_{c(2)}$ значительно уменьшается, и т. д.

Обычно достаточную точность дают один-два дополнительных расчета. Раздельные предварительные

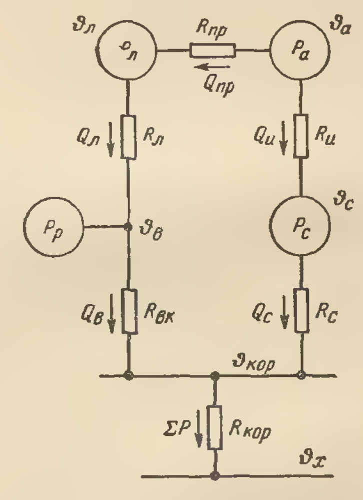


Рис. 11-8. Тепловая схема замещения закрытой обдуваемой машины.

расчеты статора и ротора выполняются по сравнительно простым уравнениям, приведенным выше.

В закрытых машинах с внешним обдувом тепловой поток идет в основном к наружной цилиндрической поверхности обдуваемого корпуса. Поэтому удельный тепловой поток в этом направлении велик и перепад температур вдоль листов пакетов, которым обычно пренебрегают, необходимо учесть. Тепловое сопро-

тивление ярма сердечника, соответствующее этому перепаду, составит:

$$R_{яр} = \frac{h_{яр}}{\lambda_с S_{яр}}, \qquad (11\text{-}83)$$

где $h_{яр}$ — высота ярма, *см*;

$\lambda_с$ — удельная теплопроводность листовой электротехнической стали (вдоль слоя) из табл. 11-3;

$$S_{яр} \approx S_{нар},\ см^2.$$

Дополнительное сопротивление перемещению теплового потока к корпусу машины оказывает технологический зазор в месте посадки статора в корпус. Ввиду сложности физической картины перехода тепла в этом зазоре тепловое сопротивление, учитывающее последний, рекомендуется оценивать для закрытых машин опытным коэффициентом теплопередачи [Л. 18]

$$\alpha_{\delta(яр)} = 0{,}08 \div 0{,}10\ вт/град \cdot см^2. \qquad (11\text{-}84)$$

Тогда тепловое сопротивление для радиального перемещения теплового потока, определяющее температуру корпуса закрытой машины, составит:

$$R_с = R_{яр} + R_{\delta\ яр} = \frac{1}{S_{нар}}\left(\frac{1}{\alpha_{яр}} + \frac{1}{\alpha_{\delta(яр)}}\right). \qquad (11\text{-}85)$$

На рис. 11-8 показана тепловая схема замещения для закрытой обдуваемой машины. В схему введены потери ротора $P_р$, включающие механические потери в подшипниках машины (за исключением потерь на внешний вентилятор). Тепловые сопротивления $R_и$, $R_{пр}$, $R_л$, $R_с$ определяются аналогично предыдущему. Сопротивление $R_{в.к}$ характеризует перепад температур $\vartheta_в - \vartheta_{кор}$ между нагретым внутренним воздухом и корпусом, сопротивление $R_{кор}$ — перепад температуры корпуса относительно средней температуры охлаждающего наружного воздуха.

По (11-57) значение

$$R_{в.к} = \frac{1}{\alpha S_{в.к}}, \qquad (11\text{-}86)$$

где α — определяется по (11-50) и табл. 11-7 при коэффициенте $k_0 = 0{,}07 \div 0{,}05$;

$S_{в.к}$ — внутренняя поверхность корпуса, омываемая воздухом, включает свободную от сердечника статора внутреннюю цилиндрическую часть корпуса и две внутренние торцевые части подшипниковых щитов, *см*².

Тепловое сопротивление $R_{кор}$ определяется наружной теплорассеивающей поверхностью корпуса, бо́льшая часть которой относится к оребренной поверхности, а меньшая включает боковые поверхности подшипниковых щитов. Коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности определяется с учетом коэффициента $k_р$ (11-53):

$$\alpha'_{кор} = k_р \alpha, \qquad (11\text{-}87)$$

где α берется по (11-46) или (11-46а) с учетом уменьшения скорости воздуха на 40—60% вследствие отклонения воздушных струй, создаваемых наружным вентилятором машины при отсутствии колпака, закрывающего ребра. При наличии экранирующего колпака скорость воздуха определяется из вентиляционного расчета.

Коэффициент теплоотдачи боковой поверхности подшипникового щита со стороны вентилятора $\alpha''_{кор}$ может быть выбран при скорости обдува по (11-46а). Боковая поверхность подшипникового щита с противоположной стороны вентилятора охлаждается хуже; $\alpha'''_{кор}$ может быть взято равным коэффициенту α для спокойного воздуха из табл. 11-8. Результирующее тепловое сопротивление $R_{кор}$ определяется с учетом суммирования тепловых потоков с поверхностей $S'_{кор}$, $S''_{кор}$ и $S'''_{кор}$, имеющих коэффициенты теплоотдачи $\alpha'_{кор}$, $\alpha''_{кор}$ и $\alpha'''_{кор}$:

$$R_{кор} = \frac{1}{\alpha'_{кор} S'_{кор} + \alpha''_{кор} S''_{кор} + \alpha'''_{кор} S'''_{кор}}. \qquad (11\text{-}88)$$

Тепловая схема замещения на рис. 11-8 содержит 11 неизвестных, определяемых из 11 уравнений. Окончательные расчетные формулы

для превышений температур обмотки и сердечника получаются громоздкими и неудобными для расчета.

В асинхронных машинах малой и средней мощности (до 250 *квт*) температура пазовой части обмотки $\vartheta_{об}$ отличается от температуры лобовых частей $\vartheta_л$ незначительно. В тепловой схеме на рис. 11-8 это означает отсутствие теплового сопротивления

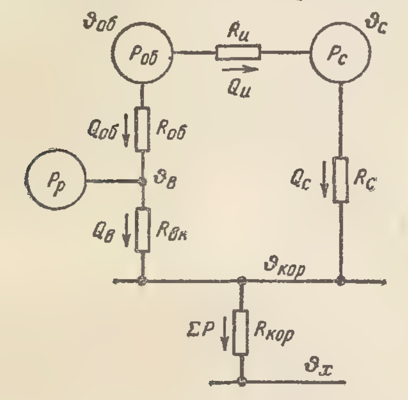


Рис. 11-9. Упрощенная тепловая схема замещения обдуваемой машины.

$R_{пр}$. Приняв $R_{пр}=0$, получим упрощенную тепловую схему замещения закрытой асинхронной машины (рис. 11-9) с шестью неизвестными.

Решение системы шести уравнений с шестью неизвестными дает следующие расчетные формулы среднего превышения температуры над температурой охлаждающего воздуха $\vartheta_х$:

для обмотки статора

$$\Theta_{об}=\frac{P_{об}(R_с-R_и)+P_сR_с+P_рR_{вк}\dfrac{R_с+R_{вк}}{R_л+R_{вк}}}{1+\dfrac{R_с+R_и}{R_л+R_{вк}}}+$$

$$+\Theta_{кор}; \qquad (11\text{-}89)$$

для сердечника статора

$$\Theta_с=\frac{P_сR_и+\vartheta_{об}}{1+R_и/R_с}+\Theta_{кор}; \qquad (11\text{-}89а)$$

для корпуса

$$\Theta_{кор}=(P_{об}+P_с+P_р)R_{кор}, \qquad (11\text{-}90)$$

где $P_{об}$, $P_с$, $P_р$ — потери соответственно обмотки статора, сердечника статора и ротора, *вт*.

Тепловые сопротивления определяются по приведенным выше формулам: $R_и$ — по (11-67); $R_л$ — по (11-69); $R_с$ — по (11-85); $R_{вх}$ — по (11-86); $R_{кор}$ — по (11-88).

Расчет электрических потерь в обмотках при определении среднего значения превышения температуры производится по сопротивлению нагретой обмотки. Это сопротивление рассчитывается по максимально допустимой температуре обмотки, равной допустимому превышению температуры, указанному в табл. 11-1, в зависимости от класса нагревостойкости изоляции обмотки плюс 40° С, что дает некоторый «тепловой запас».

Для удобства расчетов в табл. 11-8 приведены для проводниковой меди значения электрической

Таблица 11-8

Значения удельной электропроводимости γ_ϑ и коэффициента увеличения сопротивления k_ϑ

Условия расчета	При максимально допустимой температуре $\vartheta_м$					При расчетной рабочей температуре	
Класс изоляции	A	E	B	F	H	A, E и B	F и H
Температура ϑ, °С	110	115	120	140	165	75	115
Удельная электропроводимость γ_ϑ, *см/ом·мм²*	4 260	4 070	4 020	3 800	3 570	4 600	4 070
Коэффициент увеличения сопротивления $k_\vartheta=\gamma_{20}/\gamma_\vartheta$	1,32	1,37	1,40	1,47	1,57	1,22	1,37

Для статорных обмоток, компаундированных асфальто-битумными компаундами с температурой размягчения $\vartheta=105°$ С, имеем: $\gamma_{105}=4\,200$; $k_{105}=1{,}34$.

удельной проводимости и коэффициента увеличения сопротивления при различных температурах (в зависимости от класса нагревостойкости изоляции).

Тепловая схема якоря машины постоянного тока из-за тепловой связи обмотки якоря с коллектором значительно осложняет ее расчет. Поэтому обычно для якоря применяют упрощенную тепловую схему на рис. 11-6, *в*; нагревание коллектора рассчитывают отдельно по формуле

$$\Theta_к = \frac{P_к}{\alpha_к S_к}, \qquad (11\text{-}91)$$

где $P_к$ — полные потери на коллекторе;

$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи коллектора по (11-49);

$S_к$ — теплорассеивающая поверхность коллектора:

$$S_к \approx \pi D_к l_к, \ см^2$$

($D_к$, $l_к$ — диаметр и длина коллектора, *см*).

11-6. УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Выше отмечалось, что тепловой расчет может дать большие отклонения расчетных превышений температур от действительно наблюдаемых. Но даже приблизительные данные превышений температур, позволяя выяснить картину тепловой напряженности отдельных частей машины, представляют большую ценность при расчете машины.

Ниже приводятся упрощенные формулы теплового расчета, применяемые в заводской практике для нормальных машин защищенного исполнения. Они базируются на следующих допущениях. Принимается, что все потери, выделяемые в пределах активной длины стали статора (или ротора), отводятся с цилиндрической охлаждаемой поверхности статора (или ротора), а потери в лобовых частях обмотки — с охлаждаемой поверхности этих частей. При этих допущениях по приведенным выше расчетным формулам определяется отдельно превышение температуры Θ_1 части обмотки, находящейся в пределах l_1 активной длины стали, и отдельно превышение температуры Θ_2 лобовых частей на длине l_2 лобовых частей.

Среднее превышение температуры Θ всей обмотки находят как среднее арифметическое значение превышений, отнесенное к 1 *пог. см* длины обмотки:

$$\Theta = \frac{\Theta_1 l_1 + \Theta_2 l_2}{l_1 + l_2}. \qquad (11\text{-}92)$$

Ниже приводим упрощенные формулы теплового расчета для отдельных видов машин.

А. Машины постоянного тока

а) Якорная обмотка

1. Перепад температуры $\Theta_и$ в изоляции якорной обмотки. Значение $\Theta_и$ определяем по (11-19). Предварительно находим удельный тепловой поток, приходящийся на 1 *см*² поверхности стенок паза:

$$q_п = \frac{Q}{S} = \frac{P_{э(а)}}{Z_1 \Pi_1 l_1}, \ вт/см^2, \qquad (11\text{-}93)$$

где $P_{э(а)}$ — электрические потери в якорной обмотке в части активной длины якоря, *вт*;

Z_1 — число пазов якоря;

Π_1 — периметр паза, *см*;

l_1 — активная длина якоря, *см*.

Преобразовав (11-93), используя формулу (1-16), где $\rho = 1/\gamma_\vartheta$, получим:

$$q_п = \frac{P_{э(а)}}{Z_1 \Pi l_1} = \frac{A \Delta k_f}{\gamma_\vartheta} \cdot \frac{t_1}{\Pi_1}, \ вт/см^3, \qquad (11\text{-}94)$$

где t_1 — зубцовое деление якоря, *см*;

k_f — коэффициент добавочных потерь (коэффициент Фильда) по (8-48а) или (8-48б);

γ_ϑ — удельная электропроводимость меди (*см/ом·мм*²) из табл. 11-8.

Односторонняя толщина изоляции составляет:

$$\delta_и = \frac{\Sigma\,\delta_{и.п} + \delta_{и.пр}}{2}, \qquad (11\text{-}95)$$

где $\Sigma\delta_{и.п}$ — толщина пазовой и секционной изоляции якоря по ширине паза, включая допуск на укладку;

$\delta_{и.пр}$ — толщина изоляции одного провода (двусторонняя).

Значение коэффициента теплопроводности $\lambda_и$ пазовой изоляции принимаем согласно табл. 11-3.

После подстановки (11-94), (11-95) и значения $\lambda_и$ в (11-19) получим расчетную формулу для перепада температур по толщине изоляции:

$$\Theta_и = \frac{A\Delta k_f t_1 \delta_и}{\gamma_\vartheta \lambda_и \Pi_1}, \ ^\circ C, \qquad (11\text{-}96)$$

где A — линейная нагрузка якоря, *а/см*;

Δ — плотность тока обмотки якоря, *а/мм²*;

t_1 — зубцовое деление, *см*;

$\delta_и$ — толщина изоляции, *см*;

Π_1 — периметр паза, *см*.

2. **Превышение температуры Θ_α внешней поверхности якоря над температурой охлаждающего воздуха.** Значение Θ_α рассчитываем по (11-56). Предварительно определяем удельный тепловой поток q_a, приходящийся на 1 *см²* внешней цилиндрической поверхности якоря, включая при аксиальной вентиляции поверхность аксиальных вентиляционных каналов:

$$q_a = \frac{P_{э(a)} + P_c}{\pi D l_1 + n_в \pi d_в l_1}, \ вт/см^2. \qquad (11\text{-}97)$$

Заменив значение ρ через $1/\gamma_\vartheta$, где γ_ϑ берется из табл. 11-8, получим:

$$q_a = \frac{A\Delta k_f}{\gamma_\vartheta\left(1 + \frac{n_в d_в}{D}\right)} + \frac{P_c}{\pi D l_1\left(1 + \frac{n_в d_в}{D}\right)}, \ вт/см^2, \qquad (11\text{-}98)$$

где P_c — потери в стали якоря по (8-36), *вт*;

A и Δ — линейная нагрузка якоря в *а/см* и плотность тока в якоре (*а/мм²*);

$n_в$ — число аксиальных вентиляционных каналов;

$d_в$ — диаметр аксиального вентиляционного канала, *см*;

D — диаметр якоря, *см*.

При радиальной вентиляции принимается

$$n_в d_в = 0.$$

Коэффициент теплоотдачи α_v в формуле (11-56) находим по (11-50). В зависимости от системы вентиляции принимаем:

при радиальной вентиляции

$$\alpha_v = 6{,}6\cdot 10^{-3}(1 + 0{,}1\, v_a), \ вт/см^2\cdot град, \qquad (11\text{-}99а)$$

где окружная скорость якоря

$$v_a = \frac{\pi D n}{6\,000}, \ м/сек;$$

при аксиальной вентиляции

$$\alpha_v = 2{,}2\cdot 10^{-3}(1 + 0{,}1\, v_в), \ вт/град\cdot см^2, \qquad (11\text{-}99б)$$

где окружная скорость вентилятора

$$v_в = \frac{\pi D_в n}{6\,000}, \ м/сек$$

($D_в$ — внешний диаметр вентилятора, *см*).

Подставив (11-98) и (11-99) в (11-56), найдем искомое превышение температуры:

$$\Theta_\alpha = \frac{q_a}{\alpha_v}, \ ^\circ C. \qquad (11\text{-}100)$$

3. **Превышение температуры $\Theta_л$ внешней поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха.** Значение $\Theta_л$ находим, так же как и значение Θ_α, по формуле (11-56). Удельный тепловой поток $q_л$ внешней поверхности лобовых частей определяется только потерями в них. Используя (1-16) и учитывая, что аксиальная длина внешней охлаждаемой поверхности лобовых частей, укрепленных на обмоткодержателях, уменьшится по сравнению с длиной лобовой части $l_л$ полувитка

в отношении $l_л : 2l_в$, где $l_в$ — односторонняя длина вылета лобовых частей, получим:

$$q_л = \frac{\rho A\Delta}{100} \cdot \frac{l_л}{2l_в}, \ вт/см^2.$$

Для машин нормального исполнения можно принять:

$$l_л/2l_в \approx 1,4.$$

Заменив значение ρ через $1/\gamma_\vartheta$, где γ_ϑ берется из табл. 11-8, получим:

$$q_л = \frac{1,4\,A\Delta}{\gamma_\vartheta}, \ вт/см^2. \quad (11\text{-}101)$$

Коэффициент теплоотдачи α_v рассчитываем по формуле

$$\alpha_v = 3 \cdot 10^{-3}(1 + 0,1\,v), \quad (11\text{-}102)$$

где v — окружная скорость якоря при радиальной вентиляции или вентилятора при аксиальной вентиляции, *м/сек*.

Превышение температуры $\Theta_л$ поверхности лобовых частей над температурой охлаждающего воздуха составит:

$$\Theta_л = q_л/\alpha_v, \quad (11\text{-}103)$$

где α_v рассчитывается по (11-102), а $q_л$ по (11-101).

4. **Превышение температуры обмотки якоря.** Среднее значение превышения температуры обмотки якоря находим по (11-92):

$$\Theta_a \approx \frac{(\Theta_и + \Theta_\alpha)\, l_1 + \Theta_л\, l_л}{l_1 + l_л}, \quad (11\text{-}104)$$

где $\Theta_и$ рассчитано по (11-96), Θ_α — по (11-100) и $\Theta_л$ — по (11-103);

l_1 — активная длина якоря, *см*;

$l_л$ — длина лобовой части якоря, *см*.

б) Обмотка возбуждения

Превышение температуры обмоток возбуждения слагается из перепада температур внутри катушек возбуждения и между внешней поверхностью катушек и охлаждающим воздухом. Определение перепада температур в толще катушек возбуждения, выполняемых обычно из ряда слоев, представляет большие трудности. Для большинства машин нормального исполнения можно принять на основании опыта, что перепад температур внутри многослойных катушек составляет около 25% превышения температуры внешней поверхности над температурой охлаждающего воздуха. Последнее можно рассчитать по (11-56).

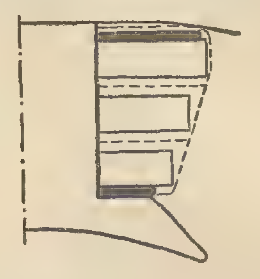


Рис. 11-10. Теплорассеивающая поверхность катушки возбуждения (периметр поверхности показан пунктиром).

Удельный тепловой поток, приходящийся на 1 *см²* теплорассеивающей поверхности катушек, определяется потерями в обмотке возбуждения $P_{э(в)}$ и площадью $S_в$ этой поверхности:

$$q_в = P_{э(в)}/S_в, \ вт/см^2, \quad (11\text{-}105)$$

где $P_{э(в)}$ берется в ваттах, а $S_в$ — в квадратных сантиметрах.

Если принять коэффициент теплоотдачи поверхности по формуле

$$\alpha_v = 0,5 \cdot 10^{-3}(1 + 0,7\sqrt{v_a}), \ вт/град \cdot см^2, \quad (11\text{-}106)$$

то величина $S_в$ должна быть рассчитана как среднее арифметическое величины поверхности, омываемой воздухом, и величины поверхности теплоизлучения, показанной пунктиром на рис. 11-10.

Окружная скорость якоря v_a в формуле (11-106) должна быть взята в метрах в секунду.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения с учетом сказанного выше будет:

$$\Theta_в = q_в/\alpha_v, \ ^\circ C. \quad (11\text{-}107)$$

Формула (11-107) пригодна как для обмоток возбуждения главных

полюсов, так и для многослойных обмоток добавочных полюсов.

в) Коллектор

Превышение температуры внешней поверхности колектора над температурой охлаждающего воздуха определяется потерями на коллекторе и может быть рассчитано по (11-91).

Б. Асинхронные машины

Приведенные здесь формулы относятся к машинам серии А. Они также могут быть применены с некоторым приближением и для машин серии А2.

а) Статорная обмотка

1. **Перепад температур в изоляции обмотки статора $\Theta_и$.** Значение $\Theta_и$ рассчитывается по формуле (11-96).

2. **Превышение температуры Θ_a внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха.** В асинхронных машинах за охлаждаемую поверхность статора при радиальной вентиляции условно принимают поверхность по внутреннему диаметру статора D, а при аксиальной вентиляции — наружную поверхность по внешнему диаметру статора D_a. Соответственно расчетные формулы для удельного теплового потока, приходящегося на 1 *см*² охлаждаемых поверхностей статора, принимают следующий вид:

для машин с радиальной вентиляцией

$$q_с = \frac{A\Delta k_f}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{с1} + 0{,}5P_{доб}}{\pi D l_1}, \text{ вт/см}^2; \quad (11\text{-}108а)$$

для машин с аксиальной вентиляцией

$$q_с = \frac{A\Delta k_f}{\gamma_\vartheta} \cdot \frac{D}{D_a} + \frac{P_{с1} + 0{,}5\,P_{доб}}{\pi D_a\, l_1}, \quad (11\text{-}108б)$$

где $P_{с1}$ — потери в стали статора при холостом ходе, *вт*; определяются как сумма потерь, рассчитанных по (8-24), (8-26), (8-30), (8-31) и (8-32);

$P_{доб}$ — добавочные нагрузочные потери машины, *вт* (в формуле принято, что добавочные нагрузочные потери[1], составляющие для асинхронных машин 0,5%, распределяются поровну между статором и ротором);

γ_ϑ — удельная электропроводимость нагретой меди (по табл. 11-8);

A — линейная нагрузка обмотки статора, *а/см*;

Δ — плотность тока в статорной обмотке, *а/мм*²;

D — внутренний диаметр статора, *см*;

D_a — внешний диаметр статора, *см*.

Размеры стали статора должны быть взяты в сантиметрах.

Значение коэффициента теплоотдачи α_v охлаждаемой поверхности статора определяем по (11-50):

$$\alpha_v = \alpha_0 (1 + 0{,}1v), \text{ вт/град}\cdot\text{см}^2, \quad (11\text{-}109)$$

где значение α_0 в зависимости от системы вентиляции равно:

$6{,}6 \cdot 10^{-3}$ — для радиальной вентиляции;
$3{,}3 \cdot 10^{-3}$ — для аксиальной вентиляции;

v — окружная скорость ротора при радиальной вентиляции и вентилятора при аксиальной вентиляции, *м/сек*.

Из условия (11-56) находим искомое превышение:

$$\Theta_a = q_c/\alpha_v, \text{ °C}. \quad (11\text{-}110)$$

3. **Превышение температуры $\Theta_л$ внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха.** Так как лобовые части обмотки статора обычно образуют своеобразную решетку, продуваемую воздухом, то они охлаждаются почти по всему периметру поперечного сечения каждой якорной секции. Соответственно этому удельный тепловой поток на

[1] При литой алюминиевой обмотке ротора добавочные потери принимаются равными приблизительно 1%.

1 $см^2$ охлаждаемой поверхности лобовых частей равен:

$$q_л = \frac{A\Delta}{\gamma_\vartheta} \cdot \frac{t_1}{\Pi_1}, \ вт/см^2, \qquad (11\text{-}111)$$

где t_1 — зубцовое деление статора, *см*;

Π_1 — периметр поперечного сечения паза статора, *см*;

A — линейная нагрузка в *а/см* и плотность тока в статоре (*а/мм*²);

λ_ϑ — удельная электропроводность меди (из табл. 11-8).

Рассчитав коэффициент теплорассеяния по (11-50), определим по (11-56) превышение температуры внешней поверхности лобовых частей статора:

$$\Theta_л = \frac{q_л}{1{,}33\cdot10^{-3}(1+0{,}05\,v)}, \ °C, \quad (11\text{-}112)$$

где v — окружная скорость ротора при радиальной вентиляции и вентилятора при аксиальной вентиляции, *м/сек*.

4. **Превышение температуры обмотки статора Θ_c.** Среднее значение превышения температуры обмотки статора находим по (11-92):

$$\Theta_c = \frac{(\Theta_и+\Theta_\alpha)\,l_1+(\Theta_п+\theta_л)\,l_л}{l_1+l_л}, \ °C, \qquad (11\text{-}113)$$

где l_1 — полная длина статора, *см*;

$l_л$ — длина лобовой части обмотки статора, *см*.

б) Роторная обмотка (при фазном роторе)

1. **Перепад температур в изоляции обмотки ротора $\Theta_и$.** Значение $\Theta_и$ рассчитывается по (11-96).

2. **Превышение температуры Θ_α внешней поверхности ротора над температурой охлаждающего воздуха.** Удельный тепловой поток, приходящийся на 1 $см^2$ внешней цилиндрической поверхности ротора, включая при аксиальной вентиляции охлаждаемую поверхность вентиляционных аксиальных каналов, определяем по формуле, аналогичной (11-98):

$$q_р = \frac{A_р\,\Delta}{\gamma_\vartheta\left(1+\frac{n_в\,d_в}{D}\right)} + \frac{P_{c2}+0{,}5\,P_{доб}}{\pi\,Dl_2\left(1+\frac{n_в\,d_в}{D}\right)}, \qquad (11\text{-}114)$$

где P_{c2} — потери в стали ротора при холостом ходе, *вт*; определяются как сумма потерь, рассчитанных по (8-30) и (8-32);

$P_{доб}$ — добавочные нагрузочные потери, *вт*;

l_2 — полная длина ротора;

$A_р$ — линейная нагрузка ротора, *а/см*;

γ_ϑ — удельная электропроводимость меди (из табл. 11-8);

$\Delta_р$ — плотность тока обмотки ротора, *а/мм*²;

D — внешний диаметр ротора, равный приблизительно внутреннему диаметру статора;

$n_в$ и $d_в$ — число и диаметр вентиляционных аксиальных каналов.

В (11-114) все размеры в сантиметрах; при радиальной вентиляции принимают $n_в d_в=0$. Значение коэффициента теплоотдачи находим по (11-50):

$$\alpha_v=\alpha_0(1+0{,}1v), \ вт/град\cdot см^2, \quad (11\text{-}115)$$

где

$$\alpha_0=(4{,}0 \div 3{,}3)\cdot10^{-3}, \ вт/град\cdot см^2$$

(v — окружная скорость ротора или вентилятора, *м/сек*).

Искомое превышение температуры поверхности ротора определяем по (11-56):

$$\Theta_\alpha=q_р/\alpha_v, \ °C. \qquad (11\text{-}116)$$

3. **Превышение температуры $\Theta_л$ внешней поверхности лобовых частей ротора над температурой охлаждающего воздуха.** Значение $\Theta_л$ рассчитываем по формулам (11-101), (11-102) и (11-103).

4. **Среднее превышение температуры обмотки ротора $\Theta_р$ над температурой охлаждающего воздуха.** Искомое значение превышения темпе-

ратуры обмотки ротора определяем по формуле (11-92):

$$\Theta_р = \frac{(\Theta_и + \Theta_\alpha)\, l_2 + \Theta_л\, l_л}{l_2 + l_л}, \qquad (11\text{-}117)$$

где l_2 — полная длина ротора, *см*;

$l_л$ — длина лобовой части обмотки ротора, *см*.

в) Контактные кольца

Нагрев контактных колец при постоянно налегающих щетках может быть рассчитан по формуле (11-91), если принять в ней за $D_к$ и $l_к$ диаметр и суммарную аксиальную длину внешней поверхности колец.

В. Синхронные машины

а) Статорная обмотка

1. **Перепад температур в изоляции обмотки статора $\Theta_и$.** Перепад $\Theta_и$ в изоляции обмотки статора определяется по формулам (11-96).

2. **Превышение температуры Θ_α внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха.** Значение Θ_α определяется по (11-56). Удельный тепловой поток $q_с$ рассчитывается на 1 *см*² цилиндрической внутренней поверхности статора по формуле

$$q_с = \frac{P_{э(с)} + P_{доб(с)} + P_{с1}}{\pi D l_1} = \frac{A\Delta}{\gamma_\vartheta}\left(1 + k_f \frac{l_{ср}}{l_1}\right) + \frac{P_{с1}}{\pi D l_1}, \; вт/см^2, \qquad (11\text{-}118)$$

где $P_{с1}$ — потери в стали при холостом ходе, *вт*; рассчитываются по (8-24) и (8-26);

k_f — коэффициент добавочных потерь при нагрузке; рассчитывается по (8-56);

A — линейная нагрузка статора, *а/см*;

Δ — плотность тока в обмотке статора, *а/мм*²;

D и l_1 — внутренний диаметр и длина статора, *см*;

$l_{ср}$ — средняя длина полувитка обмотки статора, *см*;

γ_ϑ — удельная электропроводимость нагретой меди (по табл. 11-8).

Искомое превышение температуры охлаждаемой поверхности статора находим с учетом (11-118):

$$\Theta_\alpha = \frac{q_с}{\alpha(1 + 0{,}1 v)}, \qquad (11\text{-}119)$$

где значения α в зависимости от отношения длины статора l_1 к полюсному делению τ могут быть приняты равными:

$\alpha = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $l_1/\tau \leqslant 2$;
$\alpha = 6{,}6 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $2 \leqslant l_1/\tau \leqslant 4$;
$\alpha = 5{,}7 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $4 \leqslant l_1/\tau \leqslant 5$;

v — окружная скорость ротора, *м/сек*.

3. **Превышение температуры $\Theta_л$ внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха.** Значение превышения температуры $\Theta_л$ лобовых частей статора синхронных машин рассчитывается аналогично значению превышения той же температуры в асинхронных машинах. Удельный тепловой поток $q_л$ находим по (11-111).

Значение искомого превышения температуры $\Theta_л$ составит:

$$\Theta_л = \frac{q_л}{\alpha(1 + 0{,}07 v)}, \; °C, \qquad (11\text{-}120)$$

где значения α в зависимости от полюсного деления могут быть приняты равными:

$\alpha = 1{,}33 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $\tau \leqslant 40$ *см*;
$\alpha = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $40 < \tau \leqslant 60$ *см*;
$\alpha = 0{,}66 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см*² при $\tau > 60$ *см*;

v — окружная скорость ротора, *м/сек*.

4. **Среднее превышение температуры обмотки статора $\Theta_с$.** Искомое превышение температуры обмотки статора находим по (11-113).

б) Обмотка возбуждения ротора

Метод упрощенного расчета обмотки возбуждения явнополюсных синхронных машин, основанный на использовании заводской практики, приведен в гл. 14; см. также [Л. 108,

109, 110, 114]. По расчету обмоток возбуждения турбогенераторов см. [Л. 113; 113а, 114, 112].

11-7. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВАНИЯ И РАСЧЕТ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Выше отмечалось, что расчет неустановившихся тепловых процессов становится возможным, если электрическую машину или отдельные ее части принимать за однородное тело. В этом случае уравнение (11-15) позволяет сравнительно просто решить задачу. Ближе всего для рассмотрения электрической машины как однородного тела подходят закрытые машины. В них, как показывает опыт, медь и сталь машины по прошествии некоторого весьма небольшого времени нагреваются приблизительно, как однородное тело.

В открытых и вентилируемых машинах можно рассматривать независимо отдельные их части. Например, якорь машины постоянного тока и ее обмотки возбуждения, обдуваемые обычно раздельными струями воздуха, можно с достаточной точностью рассчитывать независимо. Однако даже в последнем случае якорь является сложным телом, включающим обмотку, изоляцию и сталь.

Ниже приводится приближенный метод теплового расчета неустановившегося режима якоря машины постоянного тока защищенного исполнения с аксиальной вентиляцией, основанный на использовании уравнений (11-15а) и (11-15б). Первоначально при этом расчете определяются тепловые сопротивления схемы замещения якоря в предположении, что обмотка и сердечник имеют одинаковую температуру (на рис. 11-6, *в* $R_и=0$). Затем вычисляется установившееся значение превышения температуры обмотки Θ_∞, соответствующее заданным потерям ΣP. Эквивалентная постоянная времени определяется по формуле

$$\tau=\frac{(c_м G_м+c_и G_и+c_с G_с)\Theta_\infty}{\Sigma P},\ сек, \qquad (11\text{-}121)$$

где $c_м$, $c_и$ и $c_с$ — удельные теплоемкости меди, изоляции и стали (заимствуются из табл. 11-9);

$G_м$, $G_и$ и $G_с$ — веса меди обмотки якоря, изоляции и активной стали, *кг*;

ΣP — потери в обмотке и стали сердечника, *вт*.

Вес изоляции обмотки $G_и$ приближенно принимают равным 10—20% веса меди, а влияние теплоемкости массы якорной втулки и других конструктивных деталей можно учесть увеличением веса активной стали на 10—20%.

Постоянная времени, как следует из (11-16), обратно пропорциональна коэффициенту телоотдачи α нагретых поверхностей. Поэтому хорошо вентилируемые машины имеют меньшие значения τ. При ухудшении вентиляции, например при снижении скорости вращения или остановки машины, постоянная времени увеличивается в отношении α_v/α_0, где α_v и α_0 — коэффициенты теплоотдачи вращающейся и неподвижной машин.

В остановленных машинах без вентиляции постоянные времени возрастают в 3—4 раза.

Таким образом, зная величины Θ_∞ и τ и исходя из заданных начальных условий, определяющих Θ_0, строят по уравнению (11-15) кривую нагрева якоря. Аналогично находят кривую охлаждения, учитывая изменение величины τ в зависимости от режима вращения якоря.

На основании данных испытаний машин постоянного тока [Л. 88] для приближенных расчетов можно принять следующие значения постоянных времени: а) для якорей и многослойных катушек возбуждения при диаметре якоря $D\leqslant 600$ *мм* с вентилятором на валу и $n_н=600\div 3\,000$ *об/мин* $\tau=0{,}5\div 1$ *ч*; б) для якорей и многослойных катушек возбуждения при $D>600$ *мм* с вентилятором на валу или независимой вентиляцией $\tau=1\div 2$ *ч*; в) для коллекторов и обмоток добавочных полюсов из неизолированной полосовой меди, наматываемой на ребро, $\tau=25\div 40$ *мин*.

Кривые нагревания и охлаждения, найденные по предложенной методике для якоря и других элементов машины, принятых приближенно за однородные тела, позволяют определить их температуру для любых режимов работы машины. Эта же методика применима к закрытой машине.

Таблица 11-9

Удельные теплоемкости материалов, *дж/град·кг*

Наименование материала	Удельный вес, $г/см^3$	Теплоемкость
Медь красная	8,9	390
Железо и сталь	7,7	480
Алюминий (литой)	2,56	870
» (тянутый)	2,6	920
Бронза (фосфористая)	8,4	385
Латунь	8,45	380
Чугун	7,2	500
Асбест листовой	2,1	840
Слюда (в среднем)	2,9	865
Миканит	2,4	920
Электрокартон	1,15	1 760
Изоляция классов А, Е (в среднем)	1,3	1 500
То же классов В, F, H	2,3	1 250
Дерево (материал клиньев)	0,7	2 500
Масло	0,95	1 700
Воздух (при 760 *мм рт. ст.* и 0° С)	1,23 $кг/м^3$	1 000

Примечание. Значения теплоемкости различных материалов, приведенных в настоящей таблице, являются приближенными и относятся к интервалу температур 0—125° С.

11-8. НАГРЕВАНИЕ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ И СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА ВРЕМЯ ПУСКА

При пуске короткозамкнутых асинхронных и синхронных двигателей токи их достигают 6—7-кратных значений по отношению к номинальным. Если время пуска велико, то обмотки таких двигателей будут сильно нагреваться. При частых пусках нагревание обмоток может оказаться чрезмерным, что приведет к быстрому старению (износу) их изоляции. Поэтому расчет нагревания обмоток двигателя за время пуска представляет собой задачу, имеющую важное значение. Однако решение ее связано с весьма большими трудностями. Мы здесь имеем сложные процессы теплообмена между обмотками, сталью статора или ротора и охлаждающим воздухом.

При практических расчетах в качестве критерия, позволяющего приближенно оценить нагревание обмотки статора или ротора, принимается температура обмотки, рассчитанная при допущении, что процесс нагревания за время пуска является адиабатическим, т. е. протекает без теплообмена с другими телами. Такое допущение не всегда соответствует действительным условиям, так как постоянная времени нагревания обмотки, когда тепло от нее в основном передается стали статора или ротора, может быть соизмерима со временем пуска, например для беличьей клетки ротора, стержни которой имеют почти непосредственное соприкосновение со сталью ротора.

Вместе с тем указанная температура позволяет все же, как подтверждает опыт, приближенно оценить способность обмотки противостоять большим перегрузкам, если длительность их мала, и во многих случаях может служить хотя бы для предварительной ориентировки.

При адиабатическом процессе нагревания все тепло, образующееся в теле, в нем же и остается. Тогда уравнение нагревания тела в соответствии с (11-13) запишется в следующем виде:

$$d\Theta = \frac{Q}{C}\,dt \qquad (11\text{-}122)$$

или

$$\Delta\Theta = \frac{Q}{C}\,\Delta t = \frac{Q}{cG}\,\Delta t, \qquad (11\text{-}123)$$

где $\Delta\Theta$ и Δt — конечные приращения; c и G — удельная теплоемкость и вес тела.

Следовательно, если известны Q и cG, то для любого значения Δt можно найти повышение температуры $\Delta\Theta$. Мы видим, что при данных Q и Δt значение $\Delta\Theta$ зависит только от теплоемкости тела (обмотки).

Найдем отношение повышений температуры обмоток, выполненных из различных материалов, если токи и электрические потери в них одинаковы. $I^2 r_м = I^2 r_x$; здесь $r_м$ — сопротивление медной обмотки, а r_x — сопротивление обмотки из материала x. Следовательно, $r_м = r_x$, или $\rho_м \dfrac{L}{s_м} = \rho_x \dfrac{L}{s_x}$, что при равных длинах обмоток дает равенство отношений $\dfrac{s_x}{s_м} = \dfrac{\rho_x}{\rho_м}$, где s и ρ — сечение проводника и удельное сопротивление.

Теперь согласно (11-123) получим:

$$\frac{(\Delta\Theta)_x}{(\Delta\Theta)_м} = \frac{c_м G_м}{c_x G_x} = \frac{c_м \gamma_м s_м}{c_x \gamma_x s_x} = \frac{c_м \gamma_м \rho_м}{c_x \gamma_x \rho_x}, \qquad (11\text{-}124)$$

где $(\Delta\Theta)_м$, $c_м$ и $\gamma_м$ — повышение температуры медной обмотки, удельная теплоемкость и удельный вес меди, а $(\Delta\Theta)_x$, c_x и γ_x — то же для обмотки из материала x.

Сделаем соответствующие расчеты значений c_x, γ_x, ρ_x для применяемых обмоточных материалов и результаты сведем в *табл. 11-10*.

Приведенные в табл. 11-10 приближенные значения относятся к обмоточным материалам, применяемым для беличьих клеток асинхронных двигателей и пусковых клеток синхронных двигателей.

Если пренебречь небольшим различием температурных коэффициентов, то повышение температуры за одно и то же время согласно данным табл. 11-10 и (11-124) будет составлять для алюминиевой обмотки

Таблица 11-10

Материалы	c	γ	ρ_{15}/ρ_{120}	$c\gamma\rho_{15}/c\gamma\rho_{120}$
Медь	390	8,9	$\frac{1}{57}$ | $\frac{1}{40}$	61/87
Алюминий (литой в пазах)	870	2,56	$\frac{1}{28,6}$ | $\frac{1}{20}$	78/111
Латунь (обыкновенная)	380	8,45	$\frac{1}{14,3}$ | $\frac{1}{11,8}$	224/270
Латунь (марганцовистая)	380	8,45	$\frac{1}{8,6}$ | $\frac{1}{6,7}$	370/480
Бронза (фосфористая)	385	8,4	$\frac{1}{7,1}$ | $\frac{1}{5,3}$	454/608

78%, для латунных обмоток 27 и 16.5% и для бронзовой обмотки 13,5% повышения температуры медной обмотки. Отсюда следует, что применение для обмотки материала с бо́льшим удельным сопротивлением обеспечивает более низкое значение повышения температуры ее при кратковременных нагрузках.

Время пуска. Оно определяется из основного уравнения динамики:

$$M'_{п} - M'_{c} = M'_{и} = J'_0 \frac{d\omega}{dt}. \qquad (11\text{-}125)$$

Здесь: $M'_{п}$, M'_{c}, $M'_{и}$ — мгновенные значения соответственно пускового, статического и избыточного вращающих моментов, *кГ·м*; J'_0 — момент инерции всех вращающихся частей двигателя и приводимого им во вращение механизма, т. е.

$$J'_0 = \frac{GD^2}{4g} =$$

$$= \frac{(GD^2)_{дв} + (GD^2)_{мех}}{4g}, \; кГ\cdot м\cdot сек^2, \quad (11\text{-}126)$$

где $(GD^2)_{дв}$ — маховой момент двигателя, $кГ \cdot м^2$ (по чертежу, см. гл. 9); $(GD^2)_{мех}$ — маховой момент механизма (внешний маховой момент), отнесенный к валу двигателя (по условиям задания); $g = 9{,}81$ *м/сек²*; $\omega = 1/сек$ — мгновенное значение механической угловой скорости двигателя.

Умножив все члены (11-125) на $9{,}81\, \omega_1 \cdot 10^{-3}$ *квт/кГ·м*, где $\omega_1 = 2\pi n_1/60$ при синхронной скорости вращения n_1 *об/мин*, получим:

$$M_{п} - M_{c} = M_{и} = J_0 \frac{d\omega}{dt}. \qquad (11\text{-}127)$$

Здесь: $M_{п}$, M_{c}, $M_{и}$ выражены в синхронных киловаттах;

$$J_0 = \frac{GD^2}{4g}\,\frac{2\pi n_1}{60}\, 9{,}81 \cdot 10^{-3}, \; квт\cdot сек^2. \quad (11\text{-}128)$$

Из (11-127) имеем:

$$dt = J_0 \frac{d\omega}{M_{и}} = \frac{2\pi}{60} J_0 \frac{dn}{M_{и}}. \qquad (11\text{-}129)$$

Учитывая равенство $n = n_1(1 - s)$, где s — скольжение, получим:

$$dt = -\frac{2\pi}{60} J_0 n_1 \frac{ds}{M_{и}}. \qquad (11\text{-}130)$$

Подставим (11-128) в (11-130):

$$dt = -27{,}4 GD^2 \left(\frac{n_1}{100}\right)^2 \frac{ds}{M_{и}} \cdot 10^{-3}. \qquad (11\text{-}131)$$

Умножим правую часть этого равенства на $\frac{M_{н}}{M_{н}}$ ($M_{н} = P_{н}$ *квт*):

$$dt = -T'_{мех} M_{н} \frac{ds}{M_{и}} =$$

$$= -T'_{мех} M_{н} \frac{ds}{M_{п} - M_{c}}, \qquad (11\text{-}132)$$

где

$$T'_{мех} = \frac{27{,}4 GD^2 \left(\frac{n_1}{100}\right)^2 \cdot 10^{-3}}{M_{н}}, \; сек, \qquad (11\text{-}133)$$

— механическая постоянная времени всего агрегата.

Время пуска найдем, взяв интеграл выражения (11-132):

$$t_{п} = -T'_{мех} M_{н} \int_1^0 \frac{ds}{M_{п} - M_{c}} \approx$$

$$\approx -T'_{мех} \frac{M_{н}}{M_{п(ср)}} \int_1^0 \frac{ds}{\dfrac{M_{п(ср)} - M_{c(ср)}}{M_{п(ср)}}} =$$

$$= T'_{мех} \frac{M_{н}}{M_{п(ср)}} \cdot \frac{1}{1 - \dfrac{M_{c(ср)}}{M_{п(ср)}}},$$

или

$$t_{п} = T'_{мех} \frac{M_{н}}{M_{п(ср)}} \cdot \frac{1}{k_{и}}, \qquad (11\text{-}134)$$

где величину

$$k_{и} = 1 - \frac{M_{c(ср)}}{M_{п(ср)}} = \frac{M_{и(ср)}}{M_{п(ср)}} \qquad (11\text{-}135)$$

будем называть коэффициентом избыточного момента. Средние значения вращающих моментов приближенно определяются по кривым зависимости их от скольжения s (рис. 11-11).

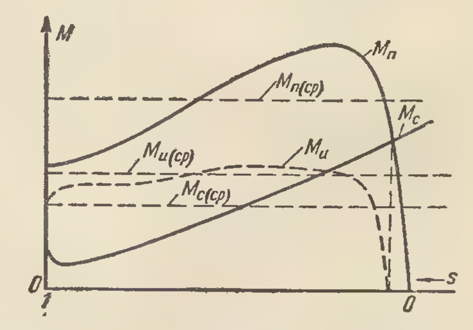


Рис. 11-11. К определению средних значений вращающих моментов.

Характерной величиной двигателя, определяющей его механические свойства, является его **механическая постоянная времени** $T_{мех}$*. Ее значение получим, заменив в (11-133) GD^2 на $(GD^2)_{дв}$:

* Величину $T_{мех}$ называют иногда электромеханической постоянной времени двигателя, хотя ее значение определяется только механическими характерными величинами последнего.

$$T_{\text{мех}} = \frac{27{,}4\,(GD^2)_{\text{дв}} \left(\frac{n_1}{100}\right)^2 \cdot 10^{-3}}{M_{\text{н}}}, \text{ сек.} \quad (11\text{-}136)$$

Для современных асинхронных короткозамкнутых двигателей (при $f_1 = 50$ *гц*) $T_{\text{мех}}$ имеет примерно следующие значения: для $P_{\text{н}} = 1 \div 100$ *квт* при $p > 1$ $T_{\text{мех}} \approx 0{,}1 \div 0{,}65$ *сек*; при $p = 1$ $T_{\text{мех}} \approx 0{,}16 \div 0{,}95$ *сек*. Можно принять $T_{\text{мех}} \equiv P_{\text{н}}^{\alpha}$, где

при $P_{\text{н}} = 0{,}3 \div 20$ *квт* $\alpha \approx 0{,}28$;
при $P_{\text{н}} = 20 \div 100$ *квт* $\alpha \approx 0{,}34$;
при $P_{\text{н}} = 100 \div 500$ *квт* $\alpha \approx 0{,}42$;
при $P_{\text{н}} = 500 \div 5\,000$ *квт* $\alpha \approx 0{,}43 \div 0{,}62$.

Для синхронных двигателей, имеющих более тяжелые роторы, $T_{\text{мех}}$ на 10—20% больше.

Нагревание обмотки ротора. Энергия, переданная ротору со статора за время пуска,

$$t_{\text{п}} M_{\text{п(ср)}} = T'_{\text{мех}} \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{п(ср)}}} \cdot \frac{1}{k} M_{\text{п(ср)}} = T'_{\text{мех}} M_{\text{н}} \frac{1}{k_{\text{и}}}, \text{ квт}\cdot\text{сек}. \quad (11\text{-}137)$$

Половина этой энергии выделяется в виде тепла во всех замкнутых контурах ротора (вне зависимости от их устройства), т. е.

$$A_{\text{э.р}} = \frac{1}{2} T'_{\text{мех}} M_{\text{н}} \frac{1}{k_{\text{и}}}, \text{ квт}\cdot\text{сек} \quad (11\text{-}138)$$

[справедливость равенства (11-138) доказывается следующим образом:

$$A_{\text{э.р}} = \int_0^{t_{\text{п}}} \sum_0^n m_{2\text{п}} i_{2\text{п}}^2 r_{2\text{п}} \cdot 10^{-3}\, dt = \int_0^{t_{\text{п}}} s p_{\text{эм}}\, dt = \int_0^{t_{\text{п}}} s M_{\text{п}}\, dt,$$

где $p_{\text{эм}} = M_{\text{п}}$ — мгновенное значение электромагнитной мощности или электромагнитного момента, *квт* (синхронные); учитывая (11-132), получим:

$$A_{\text{э.р}} = -\int_1^0 T'_{\text{мех}} M_{\text{н}} \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{п}} - M_{\text{с}}} s\, ds = \frac{1}{2} T'_{\text{мех}} M_{\text{н}} \frac{1}{k_{\text{и}}} \Big].$$

Точное определение нагревания обмотки ротора за время пуска едва ли возможно, так как при этом следовало бы учесть нагревание стали ротора и условия его охлаждения при переменной скорости вращения. Однако можно найти приближенное решение, если принять при не слишком большом времени пуска (примерно при $t_{\text{п}} \leqslant 40$ *сек*) кривую нагревания за экспоненту, соответствующую некоторому фиктивному коэффициенту теплоотдачи от стержней обмотки к стали $\alpha_{\text{с}}$.

Коэффициент $\alpha_{\text{с}}$ зависит не только от промежутков между стержнями и стенками паза, но также от размеров и условий охлаждения пакетов ротора. Его значение колеблется примерно в пределах $\alpha_{\text{с}} \approx 0{,}01 \div 0{,}10$ *вт/см²·град*. Условно будет считать его постоянным. Тогда можно будет согласно теории теплообмена между нагреваемым телом и средой, имеющей постоянную температуру, написать для превышения температуры стержней ротора следующее выражение:

$$\theta_{\text{с}} = \theta_{\text{с.у}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{п}}}{\tau_{\text{с}}}}\right). \quad (11\text{-}139)$$

Здесь установившееся превышение температуры стержней

$$\theta_{\text{с.у}} = \frac{P_{\text{ст}}}{\alpha_{\text{с}} S_{\text{с}}}, \quad (11\text{-}140)$$

где средние потери в пазовых частях стержней за время пуска

$$P_{\text{ст}} = \frac{1}{t_{\text{п}}} A_{\text{э.р}} k_{\text{к}} k_{\text{в}} \cdot 10^3, \text{ вт} \quad (11\text{-}141)$$

при $k_{\text{к}} k_{\text{в}} = 0{,}88 \div 0{,}8$ ($\sim 0{,}83$) для одноклеточного ротора, $k_{\text{к}} k_{\text{в}} = 0{,}6 \div 0{,}75$ ($\sim 0{,}7$) для пусковой клетки двухклеточного ротора и пусковой клетки синхронного двигателя ($k_{\text{к}}$ учитывает, что часть тепла создается в короткозамыкающих кольцах клетки, $k_{\text{в}}$ — что часть тепла создается в рабочей клетке двухклеточного ротора или обмотке возбуждения синхронного двигателя);

постоянная времени нагревания стержней

$$\tau_{\text{с}} = \frac{c G_{\text{с}}}{\alpha_{\text{с}} S_{\text{с}}} = \frac{c Z_2 s_{\text{с}} l_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-3}}{\alpha_{\text{с}} Z_2 \Pi l_{\text{с}}} = \frac{c s_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-3}}{\alpha_{\text{с}} \Pi}, \text{ сек}, \quad (11\text{-}142)$$

где c — удельная теплоемкость материала стержней, *вт·сек/кг·град*;
$s_{\text{с}}$ *см²* и $l_{\text{с}}$ *см* — сечение и длина пазовой части стержня;
$S_{\text{с}}$ — поверхность охлаждения всех стержней;
$\gamma_{\text{с}}$ — удельный вес материала стержней, *кг/дм³*;
Π — периметр паза, *см*;
$\alpha_{\text{с}} \approx 0{,}02$ *вт/см²·град* — по данным завода «Электросила» [Л. 79].

В обычных случаях приходится иметь дело с круглыми стержнями (пусковая клетка синхронного двигателя или двухклеточного ротора асинхронного двигателя). Тогда $s_{\text{с}} = \pi d_{\text{с}}^2/4$; $\Pi_{\text{с}} = \pi d_{\text{с}}$ и для медных стержней при $\alpha_{\text{с}} \approx 0{,}02$ получим:

$$\tau_{\text{с}} \approx \frac{390 \pi d_{\text{с}}^2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0{,}02 \pi d_{\text{с}}} \approx 44 d_{\text{с}}, \text{ сек}; \quad (11\text{-}143)$$

для латунных стержней при тех же условиях

$$\tau_c \approx 41 d_c, \ сек. \qquad (11\text{-}143а)$$

Практически, как отмечалось, во многих случаях приближенно можно считать, что процесс нагревания обмотки ротора протекает адиабатически; тогда получим:

$$\Theta_c = \frac{A_{э.р}\, k_к\, k_в}{c G_c} = \frac{\frac{1}{2} T'_{мех}\, M_н\, k_к\, k_в}{0{,}390 G_c\, k_и}. \qquad (11\text{-}144)$$

Более удобная для расчета формула получится, если согласно (11-137) подставим $T'_{мех} M_н = t_п M_{п(ср)} k_и$:

$$\Theta_c = 1{,}28 \frac{t_п\, M_{п(ср)}}{G_c} k_к\, k_в, \ °С. \qquad (11\text{-}145)$$

Отсюда можно определить максимальное допустимое время пуска $t_{п.м}$ при максимальном допустимом превышении температуры обмотки $\Theta_{с.м}$:

$$t_{п.м} = 0{,}78 \left(\frac{\Theta_{с.м}}{k_к\, k_в}\right) \frac{G_c}{M_{п(ср)}}, \ сек. \qquad (11\text{-}146)$$

По данным завода «Электросила», допустимые превышения температуры обмотки ротора при одном пуске из горячего состояния и двух пусках из холодного состояния:

$\dfrac{\Theta_{с.м}}{k_к\, k_в} \approx 250$ °С для одноклеточного ротора;

$\dfrac{\Theta_{с.м}}{k_к\, k_в} \approx 300$ °С для пусковой клетки синхронного двигателя и двухклеточного ротора асинхронного двигателя.

Подставив эти значения в (11-146), соответственно получим:

$$t_{п.м} = 195 \frac{G_c}{M_{п(ср)}}; \qquad (11\text{-}147а)$$

$$t_{п.м} = 235 \frac{G_c}{M_{п(ср)}}. \qquad (11\text{-}147б)$$

По приведенным выше соотношениям можно также найти значение максимального допустимого внешнего махового момента $(GD^2)_{мех.м}$ для данного двигателя:

$$T'_{мех.м} = t_{п.м} \frac{M_{п(ср)}}{M_н} k_и = (195 \div 235) \frac{G_c}{M_н} k_и;$$

$$(GD^2)_м = (7{,}1 \div 8{,}5) \frac{G_c}{\left(\frac{n_1}{100}\right)^2} k_и \cdot 10^3 \ кГ \cdot м^2;$$

отсюда

$$(GD^2)_{мех.м} = (GD^2)_м - (GD^2)_{дв}, \ кГ \cdot м^2. \qquad (11\text{-}148)$$

Полученные выражения показывают, что $t_{п.м}$ и $(GD^2)_{мех.м}$ будут тем больше, чем больше вес стержней G_c и коэффициент избыточного момента $k_и$. Вес стержней пусковой клетки синхронного двигателя обычно в 2—2,5 раза меньше веса стержней клетки ротора асинхронного двигателя; поэтому асинхронный короткозамкнутый двигатель более подходит для тяжелых условий пуска, чем обычный синхронный двигатель.

Нагревание обмотки статора. Почти во всех случаях можно считать, что процесс нагревания обмотки статора за время пуска протекает адиабатически. Поэтому превышение температуры обмотки статора в конце пуска можно определить по формуле

$$\theta_{ст} = \frac{A_{э.с}}{c_м\, G_{ст}} \approx \frac{\Delta^2_{п.н}}{175} t_п, \ °С. \qquad (11\text{-}149)$$

Здесь энергия электрических потерь приближенно принимается равной: $A_{э.с} \approx \approx 2{,}23 \Delta^2_{п.н} G_{ст} t_п$ *вт·сек*, где $\Delta_{п.н}$ *а/мм²* — плотность тока при начальном пусковом токе; числовой коэффициент для медной обмотки взят при $\rho_{м.50} \approx 0{,}02$; $c_м = 390$ и $\gamma_м = 8{,}9$.

Согласно [Л. 79] при двух пусках из холодного состояния и одном из горячего можно допустить максимальное превышение температуры $\Theta_{ст.м} = 45°$ С для обмотки при классе изоляции А и $\Theta_{ст.м} = 60°$ С при классе изоляции В. Тогда максимальное допустимое время пуска при классе изоляции А будет:

$$t'_{п.м} = \frac{7850}{\Delta^2_{п.н}}, \ сек; \qquad (11\text{-}150а)$$

при классе изоляции В

$$t'_{п.м} = \frac{10\,500}{\Delta^2_{п.н}}, \ сек. \qquad (11\text{-}150б)$$

Если допустимое время пуска по нагреву обмотки статора $t'_{п.м}$ меньше, чем допустимое время пуска по нагреву обмотки ротора $t_{п.м}$ по (11-147), то, следовательно, время пуска, а также допустимый маховой момент $(GD^2)_{мех.м}$ ограничиваются допустимым нагревом обмотки статора.

Для нормальных синхронных двигателей на напряжения 3, 6 и 10 *кв* время пуска обычно ограничивается допустимой температурой обмотки ротора ($t_{п.м} < t'_{п.м}$), для нормальных асинхронных двигателей при $U_н$ до 3 *кв* — также допустимой температурой обмотки ротора ($t_{п.м} < t'_{п.м}$), а для тех же двигателей на 6 *кв* — допустимой температурой обмотки статора ($t'_{п.м} < t_{п.м}$).

Можно принять, что за время пуска ток статора равен приведенному току ротора ($I_1 \approx I'_2$); тогда получим: $A_{э.с} \approx A_{э.р} \dfrac{r_1}{r'_2}$.

Последнее равенство показывает, что $A_{э.с}$ по сравнению с $A_{э.р}$ будет тем меньше, чем меньше отношение r_1/r'_2. Поэтому, например, для асинхронных короткозамкнутых двигателей, предназначенных для частых пусков, обмотку ротора выполняют с относительно высоким значением r'_2.

Согласно опыту эксплуатации асинхронных короткозамкнутых двигателей характерной величиной, позволяющей судить о тепловой нагрузке обмотки статора, может служить скорость нарастания температуры ее нагревания при пуске, т. е. величина

$$\Delta\Theta_{ст} = \frac{\Delta^2_{п.н}}{200}, \text{ } \mathit{град/сек} \quad (11\text{-}151а)$$

для медной обмотки (при $\rho_{м20} \approx 0{,}0175$);

$$\Delta\Theta_{ст} = \frac{\Delta^2_{п.н}}{86}, \text{ } \mathit{град/сек} \quad (11\text{-}151б)$$

для алюминиевой обмотки (при $\rho_{а\,20} \approx 0{,}029$; $c_а \approx 930$; $\gamma_а \approx 2{,}7$).

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

12-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Машины постоянного тока могут быть разделены на две группы: 1) общепромышленного применения; 2) специализированного назначения.

Машины общепромышленного применения широко используются главным образом в качестве двигателей для электропроводов, не требующих регулирования скорости в широких пределах. Двигатели общепромышленого применения выполняются обычно с параллельным возбуждением, имеют ограниченное снижение скорости вращения, примерно в пределах 8—15% при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной, допускают регулирование скорости вращения ослаблением поля главных полюсов не более 1 : 2 при невысоких номинальных скоростях вращения. Эти двигатели изготавливаются в защищенном исполнении и обычно с самовентиляцией.

Генераторы общепромышленного применения имеют параллельное или смешанное возбуждение, обеспечивающее приблизительно постоянное напряжение при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. Эти генераторы применяются для питания двигателей постоянного тока, небольших сетей, цепей управления, а также в качестве возбудителей крупных машин. Генераторы общепромышленного применения приводятся во вращение обычно асинхронными двигателями.

Все машины постоянного тока общепромышленного применения проектируются в виде серий, охватывающих определенные типы с заранее установленной шкалой номинальных скоростей вращения и мощностей.

Электродвигатели специализированного назначения имеют различные механические характеристики, широкие пределы регулирования скорости вращения изменением как поля главных полюсов, так и напряжения на якоре. К двигателям специализированного назначения относятся тяговые, крановые, судовые двигатели, двигатели для привода экскаваторов, прокатные двигатели и др. Эти двигатели выполняются с различным возбуждением (независимым, последовательным, смешанным). Как правило, специализированные электродвигатели изготавливаются в закрытом исполнении. Генераторы специализированного назначения имеют различные внешние характеристики и способы возбуждения (независимое, параллельное, смешанное). К специализированным генераторам относятся дизель-генераторы, возбудители синхронных машин, зарядные генераторы и др.

Машины большой мощности выпускаются только в специализированном исполнении.

Расчет каждого вида машин имеет свои особенности. Излагаемая нами методика расчета относится в основном к некомпенсированным машинам общепромышленного применения малой и средней мощности (примерно до 600 *квт*).

Все машины общепромышленного применения изготавливаются электромашиностроительными заводами

серийно. В серийном производстве, как отмечалось, каждому внешнему диаметру якоря данного габарита машины постоянного тока соответствует один внутренний диаметр; станина и штамп для полюса сохраняются для нескольких номинальных мощностей и скоростей вращения, а число пазов якоря и их размеры могут изменяться с изменением длины якоря и номинального напряжения машины (см. § 1-4).

Выбор правильных размеров серийных машин связан с рядом вопросов технологии и экономики производства.

Мы не ставили задачу дать подробную методику расчета серий с учетом всех вопросов их проектирования, а рассматриваем расчет единичной машины данного габарита серии, имеющей размеры, близкие к оптимальным.

Всякая электрическая машина должна быть так спроектирована и рассчитана, чтобы при номинальных условиях работы не был превзойден допустимый нагрев любой ее части (см. гл. 11). Особое значение для машин постоянного тока имеет проблема безыскровой коммутации.

Все современные машины постоянного тока, за исключением машин очень малой мощности (примерно менее 0,3 *квт*), снабжаются для обеспечения безыскровой коммутации добавочными полюсами. Допустимое напряжение между соседними коллекторными пластинами и удовлетворительная коммутация являются основными показателями, устанавливающими предел номинальной мощности и наибольшего напряжения, на которые можно построить машину постоянного тока (см. § 12-15).

В машинах общепромышленного применения ограничивающим показателем ее использования является, как правило, нагрев.

Техническое задание на проектирование машины постоянного тока содержит следующие данные:

1) назначение машины — генератор или двигатель;

2) номинальная мощность $P_н$, *квт*; для генераторов — выходная электрическая мощность на зажимах, для двигателей — механическая мощность на валу;

3) номинальное напряжение $U_н$, *в*;

4) номинальная скорость вращения $n_н$, *об/мин*;

5) способ возбуждения;

6) конструктивное исполнение (горизонтальный или вертикальный вал, защита от окружающей среды и др.);

7) режимы работы (см. § 11-1);

8) специальные требования (диапазон регулирования напряжения или скорости вращения, ограничения по маховому моменту, по шуму и т. д.).

Номинальная мощность должна быть, как правило, увязана со шкалой мощностей машин единой серии, выпускаемых нашей электропромышленностью (табл. 12-1, 12-2).

Номинальное напряжение устанавливается в соответствии с ГОСТ 721-41:

для генераторов — 115, 230 и 460 *в*;
для двигателей — 110, 220 и 440 *в*.

Пределы номинальных скоростей вращения связаны с номинальной мощностью. Для каждой машины имеются оптимальные пределы скорости вращения, обеспечивающие высокое использование активных материалов и наименьшую стоимость конструкции.

Как известно, мощность машины заданных габаритов пропорциональна скорости вращения. Однако при значительном возрастании скорости вращения выше оптимальной увеличение номинальной мощности ограничивается из-за ухудшения коммутации, чрезмерного роста потерь в стали и механических. Также возрастают механические напряжения во вращающихся частях.

При значительном снижении скорости вращения по сравнению с оптимальной номинальная мощность машины может также уменьшиться из-за ухудшения условий охлаждения. Следовательно, в обоих случаях отклонения от оптимальной скорости вращения использование активных материалов снижается.

Кривые рис. 12-1 дают пределы оптимальных скоростей вращения в зависимости от диаметра якоря машины.

Таблица 12-1

Шкала мощностей машин постоянного тока серии П (защищенное исполнение)

Габарит	Типоразмер	Двигатели 220 *в*					Генераторы 230 *в*	
		Скорость вращения, *об/мин*						
		600	750	1 000	1 500	3 000	1 450	2 850
		Мощность, *квт*						
1	П-11	—	—	0,13	0,3	0,7	—	—
	П-12	—	—	0,2	0,45	1,0	—	—
2	П-21	—	0,2	0,3	0,7	1,5	0,37	1,25
	П-22	—	0,3	0,45	1,0	2,2	0,6	1,6
3	П-31	—	0,45	0,7	1,5	3,2	1,0	2,6
	П-32	—	0,7	1,0	2,2	4,5	1,5	3,8
4	П-41	—	1,0	1,5	3,2	6	2,7	6,2
	П-42	—	1,5	2,2	4,5	8	3,2	7,2
5	П-51	—	2,2	3,2	6	11	5,0	11
	П-52	—	3,2	4,5	8	14	6,5	14
6	П-61	—	4,5	6	11	19	9,0	18
	П-62	—	6	8	14	25	11,5	25
7	П-71	—	8	11	19	32	16	—
	П-72	—	11	14	25	42	21	—
8	П-81	—	14	19	32	—	27	—
	П-82	—	19	25	42	—	35	—
9	П-91	19	25	32	55	—	50	—
	П-92	25	32	42	75	—	70	—
10	П-101	32	42	55	100	—	90	—
	П-102	42	55	75	125	—	110	—
11	П-111	55	75	100	160	—	150	—
	П-112	70	85	125	200	—	190	—

Таблица 12-2

Шкала мощностей двигателей постоянного тока закрытого исполнения серий ПБ, ПО и ПР (напряжение 220 *в*)

Типоразмер серии П...	Серия ПБ с естественным охлаждением			Серия ПО с наружным обдувом			Серия ПР с встроенным воздухоохладителем (радиатором)				
	Скорость вращения, *об/мин*										
	1 000	1 550	3 000	1 000	1 500	3 000	600	750	1 000	1 500	3 000
	Мощность, *квт*										
...11	—	0,15	0,33	0,11	0,2	0,45	—	—	—	—	—
...12	—	0,23	0,52	0,17	0,3	0,7	—	—	—	—	—
...21	0,24	0,35	0,8	0,3	0,45	1,0	—	—	—	—	—
...22	0,35	0,5	1,0	0,45	0,7	1,5	—	—	—	—	—
...31	0,45	0,65	1,3	0,67	1,0	2,2	—	—	—	—	—
...32	0,65	1,0	1,9	1,0	1,5	3,0	—	—	—	—	—
...41	0,7	1,2	2,3	1,2	2,0	3,8	—	—	—	—	—
...42	1,0	1,5	3,0	1,5	2,3	5,0	—	—	—	—	—
...51	1,2	1,9	—	—	—	—	—	—	2,6	4,5	7,3
...52	1,5	2,4	—	—	—	—	—	—	3,6	5,9	9,5
...61	1,8	3,2	—	—	—	—	—	3,3	4,7	7,7	12
...62	2,2	4,0	—	—	—	—	—	4,7	6,2	10,5	16,5
...71	3,0	6,0	—	—	—	—	—	6,6	8,8	13,5	—
...72	4,0	7,7	—	—	—	—	—	8,5	10,6	17	—
...81	5,0	9,3	—	—	—	—	7,7	10	13,5	21	—
...82	6,6	12,0	—	—	—	—	10	13	17,5	27,5	—
...91	—	—	—	—	—	—	12,3	16,2	21,5	34,5	—
...92	—	—	—	—	—	—	15,5	20,5	27,5	44	—
...101	—	—	—	—	—	—	18,5	24,5	33	53	—
...102	—	—	—	—	—	—	21	28	33	62	—
...111	—	—	—	—	—	—	24	32	43	72	—
...112	—	—	—	—	—	—	30	40	53	90	—

Для малых и средних машин мощностью до 200—250 *квт* окружная скорость якоря обычно не превышает 35 *м/сек*, для машин свыше 250 *квт* — 45—50 *м/сек*, и только для машин специализированного назначения, например для возбудителей к турбогенераторам, она достигает 80—90 *м/сек*.

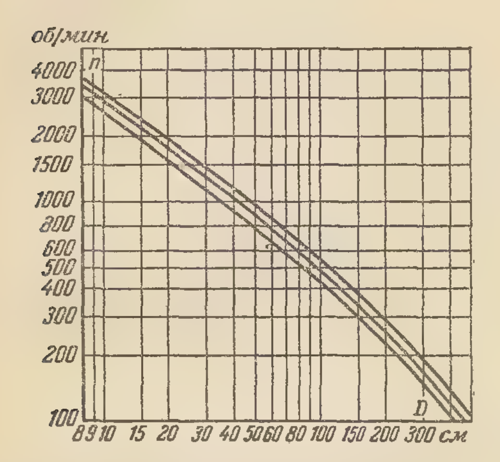


Рис 12-1. Оптимальные скорости вращения машин постоянного тока.

Выше отмечалось, что двигатели постоянного тока общепромышленного применения строятся с параллельным возбуждением и, как правило, со стабилизирующей последовательной обмоткой. Последняя служит для повышения устойчивости работы двигателей. Ее н. с. не превышает 4—5% н. с. обмотки параллельного возбуждения.

По форме исполнения генераторы изготавливаются обычно с горизонтальным валом и станиной на лапах. Электродвигатели выпускаются в различных исполнениях: 1) с горизонтальным валом и станиной на лапах; 2) с фланцевым креплением при горизонтальном или вертикальном расположении вала и др. Отметим, что форма исполнения не влияет на электромагнитный расчет машины.

12-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Главные размеры машины D и l_δ (см. гл. 1) зависят от значений магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки якоря A.

Чем больше выбраны значения B_δ и A, тем меньше будут размеры машины. Однако для B_δ и A есть свои пределы, которые не следует превышать по следующим соображениям.

При чрезмерном значении B_δ возникает сильное насыщение в зубцах якоря, что приводит к значительному возрастанию н. с. возбуждения, а следовательно, размеров и веса меди обмотки возбуждения. Кроме того, увеличиваются потери в стали якоря, обусловливая повышение нагрева якоря и снижение к. п. д. машины. Снижается к. п. д. также от увеличения электрических потерь в обмотке возбуждения.

При чрезмерных значениях A увеличивается реактивная э. д. с. в коммутируемых секциях обмотки якоря, что ухудшает коммутацию машины. Кроме того, высокие значения A вызывают повышенную реакцию якоря, что приводит к необходимости увеличивать воздушный зазор машины, а вместе с этим и н. с. обмотки возбуждения; нагрев якоря возрастает пропорционально увеличению A из-за роста удельной тепловой нагрузки поверхности якоря (см. § 1-1).

При выборе значений B_δ и A можно пользоваться кривыми рис. 12-2. Эти кривые относятся к хорошо вентилируемым машинам с добавочными полюсами, предназначенными для длительного режима работы при нормальных скоростях вращения и номинальном напряжении не выше 800 *в*.

Выбор плотности тока в якорной обмотке необходимо увязать с ее нагревом, т. е. со значениями удельной тепловой нагрузки якоря. Для этой цели на рис. 12-3 приведена кривая допустимых значений произведения $A\Delta$, где Δ — плотность тока обмотки якоря, *а/мм²*.

Размеры магнитной цепи машины зависят в основном от выбранных значений индукций для ее отдельных участков. Значения магнитных индукций в различных участ-

ках можно выбрать, руководствуясь данными табл. 12-3.

При возрастании частоты f перемагничивания якоря значения индукций в зубцах и ярме якоря не-

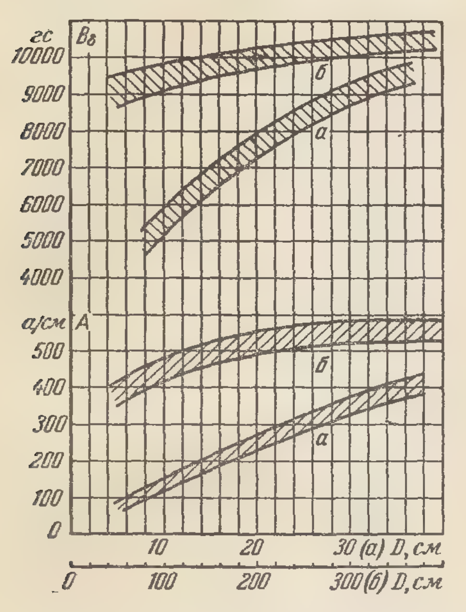


Рис. 12-2. Магнитная индукция в воздушном зазоре и линейная нагрузка в зависимости от диаметра якоря.

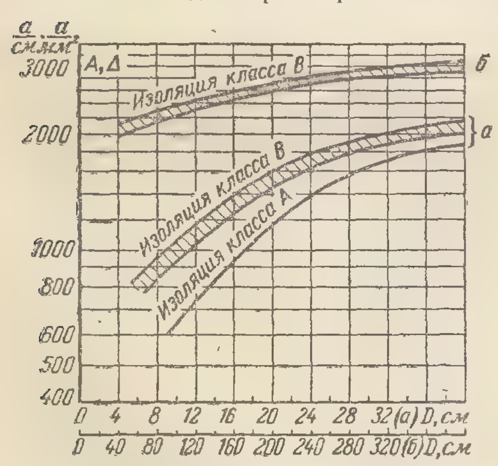


Рис. 12-3. Произведение $A\Delta$ в зависимости от диаметра якоря.

обходимо ограничить. Для этого можно воспользоваться следующими эмпирическими формулами:

1) для максимальной индукции в пазах:

при параллельных стенках паза

$$B_{z\,\text{макс}} \leqslant 24\,500 - 60f,\ гс;$$

Таблица 12-3

Магнитная индукция для стальных участков

Участки магнитной цепи	Индукция, *гс*
Ярмо якоря:	
при $p>1$	10 000—15 000
при $p=1$	До 16 000
Зубцы якоря (кажущиеся значения индукции):	
пазы грушевидной формы ($D \leqslant 20$ *см*)	17 000—19 000
пазы с параллельными стенками (индукция в узком месте зубца)	21 000—23 000
Сердечник полюса:	
для стали Э11, Ст.1, Ст.3	14 000—15 000
для стали Э330	17 000
Ярмо станины:	
для стального литья или проката	11 000—13 000
для чугунного литья	5 000—6 000

Примечание. При переводе значений индукций в тесла полученные значения в гауссах умножают на 10^{-4}.

при пазах грушевидной формы

$$B_{z\,\text{макс}} \leqslant 20\,000 - 20f,\ гс;$$

2) для ярма якоря

$$B_{z\,\text{макс}} \leqslant 16\,000 - 80f,\ гс.$$

Эти формулы применимы для электротехнической листовой стали марок Э12, Э21, Э31 при частоте перемагничивания $f \leqslant 75$ *гц*; сталь марки Э31 обычно выбирается для машин мощностью свыше 250—300 *квт* при $f \geqslant 30 \div 50$ *гц*.

Для сечений ярма якоря, ослабленных отверстиями, предназначенными для крепления листов стали на роторном остове, или аксиальными вентиляционными каналами, индукция в ослабленном месте может быть повышена до 18 000 *гс* (1,8 *тл*), если эти места имеют в тангенциальном направлении относительно короткую длину.

Для главных полюсов целесообразно применять холоднокатаную электротехническую сталь марки Э330, которая допускает более высокую магнитную индукцию, чем горячекатаная сталь (до 17 000 *гс*). В этом случае из-за уменьшения ширины сердечника полюса средняя длина витка и вес меди обмотки возбуждения тоже уменьшаются.

Выбор плотности тока в обмотках якоря и возбуждения рассматривается ниже.

12-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

На основе сведений, приведенных в гл. 1, рассмотрим метод определения главных размеров D и l_δ машины постоянного тока. По графику рис. 12-4 выбираем D с точностью $\pm 10\%$, определив предварительно значение $P_н/n_н$.

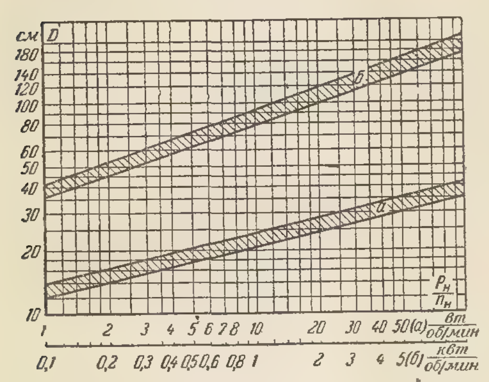


Рис. 12-4. Диаметр якоря машины постоянного тока в зависимости от $P_н/n_н$.

По табл. I-1 приложения I берем нормализованный диаметр D, ближайший к выбранному по рис. 12-4.

Для определения расчетной длины якоря l_δ предварительно находим по выбранному диаметру D значения B_δ и A, пользуясь кривыми рис. 12-2. Тогда в соответствии с (1-7) и учитывая, что для машин постоянного тока $k_0 k_B = 1$, получаем:

$$l_\delta = \frac{6{,}1P' \cdot 10^{11}}{\alpha_\delta B_\delta A D^2 n_н}, \text{ см.} \quad (12\text{-}1)$$

Для генераторов расчетная мощность P' принимается равной по (1-9):

$$P' = k_г P_н, \text{ квт.} \quad (12\text{-}2)$$

Расчетная мощность для двигателя составит по (1-9а):

$$P' = k_д \frac{P_н}{\eta_н}, \text{ квт.} \quad (12\text{-}3)$$

Предварительные значения к. п. д. машины $\eta_н$ можно взять из рис. 12-5 или табл. 12-4, значения коэффициентов $k_г$ и $k_д$ — из табл. 12-5.

По рис. 12-7 устанавливаем наиболее выгодное число полюсов $2p$ (более подробно о выборе числа полюсов см. § 12-4).

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ зависит от расчетной длины полюсной дуги b_δ главного полюса.

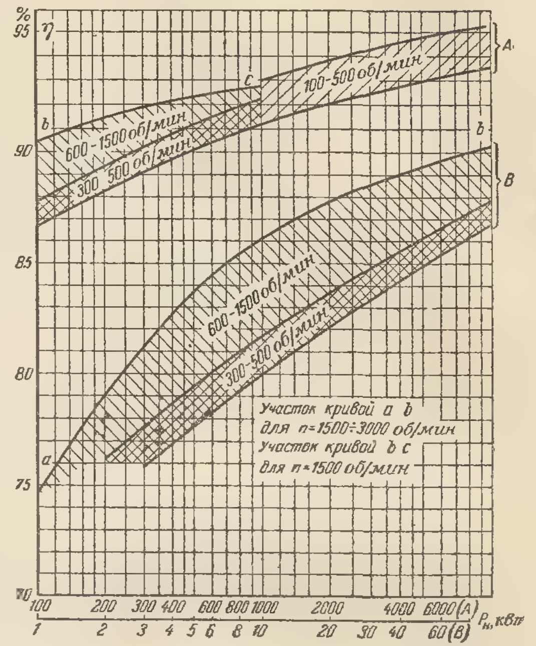


Рис. 12-5. Коэффициент полезного действия машин постоянного тока.

Предварительно можно принять расчетное значение b_δ равным действительной величине полюсной дуги b_p и α_δ — действительному коэффициенту полюсного перекрытия α_p:

$$\alpha_\delta \approx \alpha_p = b_p/\tau, \quad (12\text{-}4)$$

где τ — полюсное деление якоря.

Значение α_δ предварительно выбирается: для машин с добавочными полюсами в пределах 0,6—0,75, для машин без добавочных полюсов 0,65—0,8.

При $2p \geqslant 4$ для машин с добавочными полюсами предварительное значение α_δ можно взять по рис. 12-6. Для малых машин при $2p=2$ можно принять $\alpha_\delta \approx 0{,}6 \div 0{,}65$ (меньше для машин с добавочными полюсами). С возрастанием α_δ длина машины l_δ уменьшается. Но при

Таблица 12-4

Значения к. п. д. для машин постоянного тока серии П общепромышленного применения (защищенное исполнение)

$P_н$, *квт*	Электродвигатели, напряжение 220 *в*, при скорости вращения, *об/мин*: 600	750	1 000	1 500	3 000	Генераторы со смешанным возбуждением, напряжение 230 *в*, при скорости вращения, *об/мин*: 1 450, $P_н$, *квт*	1 450, к. п. д., %	2 850, $P_н$, *квт*	2 850, к. п. д., %
0,13	—	—	59	—	—				
0,2	—	67,5	65	—	—				
0,3	—	69,5	68,5	65	—	0,37	70,5	1,25	79,5
0,45	—	71	74,5	70,5	—	0,6	75	1,6	83,5
0,7	—	76	75	73,5	73,5	1	77	2,6	85
1,0	—	67	80	77	76	1,5	81,5	3,8	87
1,5	—	70	73	78,5	76	2,7	75,5	6,2	82,5
2,2	—	73,5	75,5	83,5	80	3,2	78	7,2	82,5
3,2	—	76,5	79,5	79	83	5	80,5	11	85,5
4,5	—	78	81	80,5	84	6,5	82	14	87
6	—	81	83,5	82	82,5	9	84	18	88,5
7	—	76	—	—	—	11,5	85	25	89
8	—	—	85	84	83,5	16	73,5		
10	—	78,5	—	—	—	21	83		
11	—	—	79,5	84	84,5	27	84		
14	—	80,5	81	86,5	86	35	86,5		
17	—	83	—	—	—	50	87		
19	81,5	—	82	8	87,5	70	89		
25	83,5	83,5	85,5	86	88,5	90	88,5		
32	84,5	86	85	87,5	84	110	90		
42	85,5	86	87	87,5	86	150	90		
55	87	87,5	87,5	87	—	190	91		
75	88	88	88,5	89,5	—				
85	—	88,5	—	—	—				
110	—	—	89	89,5	—				
125	—	—	90	90	—				
160	—	—	—	90	—				
200	—	—	—	91	—				

Таблица 12-5

Значения коэффициентов $k_г$, $k_д$ и $k_в$

Мощность машины, *квт*	$k_г$	$k_д$	$k_в$
≤1	1,4—1,15	0,7—0,84	0,2—0,08
1—10	1,2—1,1	0,82—0,87	0,1—0,0025
10—100	1,15—1,06	0,85—0,94	0,035—0,02
100—1000	1,06—1,03	0,93—0,97	0,02—0,005

большом значении α_δ, т. е. при большой полюсной дуге b_p, уменьшается межполюсное расстояние $\tau - b_p$, что приводит к возрастанию потока рассеяния главных полюсов и ухудшению коммутации. Последнее объясняется тем, что при уменьшении расстояния $\tau - b_p$ поле главных полюсов, попадая в коммутационную зону, будет индуктировать в коммутируемых секциях большую э. д. с. вращения, ухудшающую коммутацию. Во избежание этого расстояние $\tau - b_p$ проверяется при оценке коммутации (см. § 12-9). Если оно окажется заниженным, то значение α_δ

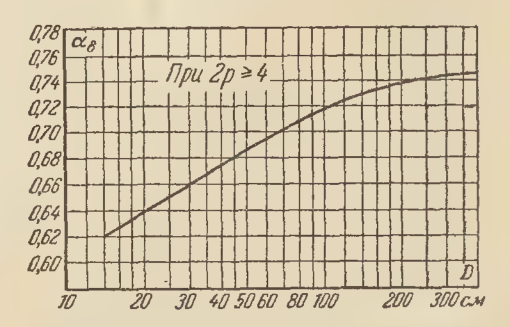


Рис. 12-6. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия в зависимости от диаметра якоря.

уменьшают, соответственно увеличивая длину машины l_δ. Значение l_δ следует также проверить по отношению

$$\lambda = l_\delta/\tau, \qquad (12\text{-}5)$$

которое для нормальных машин должно быть в пределах

$$0,5 \leqslant \lambda \leqslant 1,5. \qquad (12\text{-}5а)$$

Чем короче машина, т. е. чем меньше λ, тем меньше реактивная э. д. с., тем лучше, следовательно, коммутация. При коротком якоре также улучшаются условия его охлаждения. Однако по экономическим соображениям стремятся увеличить относительную длину якоря, так как стоимость обмоткодержателей, коллектора, подшипников почти не зависит от длины якоря, а минимальный вес меди якоря получается при приближении λ к 1,5. Если требуется снизить момент инерции якоря, выбирается повышенное значение λ. Действительная длина якоря l_1 при наличии радиальных вентиляционных каналов отличается от расчетной l_δ.

При радиальной и радиально-аксиальной (смешанной) вентиляции сердечник якоря разделяется вдоль оси машины на пакеты, каждый длиной 45—65 *мм*. Между пакетами оставляют промежутки, обычно 10 *мм* каждый, образующие радиальные вентиляционные каналы. Тогда полная длина якоря l_1 составит:

$$l_1 = (n_в + 1) l' + n_в b_в, \qquad (12\text{-}6)$$

где $n_в$ — число радиальных вентиляционных каналов;
$b_в$ — ширина одного канала;
l' — ширина одного пакета стали якоря.

Очевидно, длина всех пакетов

$$l = (n_в + 1) l' = l_1 - n_в b_в. \qquad (12\text{-}7)$$

В предварительном выборе полной длины якоря можно принять:

$$l_1 \approx (1,05 \div 1,10) l_\delta. \qquad (12\text{-}8)$$

С достаточным приближением расчетная длина l_δ определяется по (6-9):

$$l_\delta = \frac{l + l_p}{2}, \qquad (12\text{-}9)$$

где l берется из (12-7);
l_p — аксиальная длина полюсного наконечника.

При шихтованном полюсе $l_p \approx l_m$, где l_m — аксиальная длина сердечника полюса. Обычно принимают $l_p = l_1$; тогда

$$l_\delta = l_1 - 0,5 n_в b_в = l + 0,5 n_в b_в. \qquad (12\text{-}10)$$

При длине якоря, не превышающей 25—30 *см*, возможно применение аксиальной вентиляции при однопакетном сердечнике, т. е. без радиальных вентиляционных каналов. В этом случае

$$l_\delta \approx l_1 \approx l \qquad (12\text{-}11)$$

в предположении, что $l_p = l$.

После подбора всех длин уточняют значение расчетной длины l_δ. Оно может несколько отличаться от найденного l_δ по (12-1), что для дальнейшего расчета не имеет большого значения.

Вычислив $\lambda = l_\delta/\tau$, составляют таблицу вариантов (табл. 12-6) выбора главных размеров.

Таблица 12-6

Таблица вариантов выбора главных размеров

№ п/п	D	$2p$	τ	B_δ	A	λ	$\lambda' = \gamma'\lambda$	$\lambda'' = \lambda/\gamma''$
1								
2								
—								

Если рассчитывается серия и необходимо при выбранном диаметре якоря предусмотреть смежный тип машины на мощность $\gamma P_н$, то ее длина может быть принята равной γl_δ. Коэффициент нарастания мощности γ смежных типов машин (табл. 12-1) принимают равным 1,25—1,5, причем большие значения γ соответствуют меньшим номинальным мощностям машины.

12-4. ЧИСЛО ПОЛЮСОВ

Величина $2p\Phi$ при заданных размерах машины остается练 практи-

чески постоянной, мало зависящей от числа полюсов $2p$. Поэтому чем больше $2p$, тем меньше поток Ф одного полюса.

Снижение потока приводит к уменьшению сечения ярма якоря и станины, т. е. к уменьшению веса стали машины. При этом снижается вес меди якоря из-за уменьшения длины лобовых частей обмотки при меньшем полюсном делении. С увеличением $2p$ возрастает число щеточных болтов, что приводит к уменьшению тока на щеточный болт и соответственно длины коллектора.

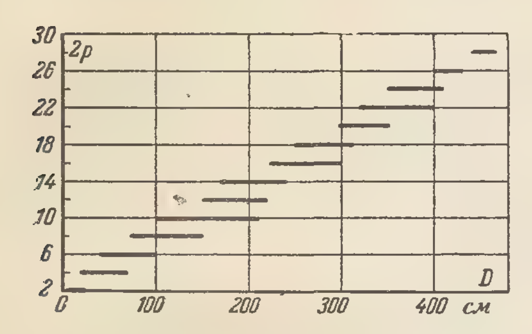


Рис. 12-7. Число полюсов машин постоянного тока.

В результате при большем числе полюсов машина становится легче.

Но, с другой стороны, увеличивается трудоемкость изготовления машины за счет увеличения количества деталей, уменьшается механическая прочность станины с уменьшением ее сечения; с возрастанием $2p$ увеличивается частота перемагничивания якоря и возрастают потери в стали и добавочные потери в обмотке якоря. Увеличивается также напряжение между соседними коллекторными пластинами при сохранении выбранного общего числа K коллекторных пластин или возникает необходимость повысить число K, чтобы не превзойти допустимого значения напряжения между соседними коллекторными пластинами.

Повышение числа K может привести к недопустимому уменьшению коллекторного деления.

Для предварительного выбора числа полюсов рекомендуются данные рис. 12-7, полученные на основании практики электромашиностроительных заводов.

Контролем выбора $2p$ может послужить допустимое значение тока щеточного болта, которое не должно превышать

$$I_{щ.б} = \frac{I_{ан}}{p} \leqslant 1\,000 \div 1\,200\,a, \quad (12\text{-}12)$$

где $I_{ан}$ — полный номинальный ток якоря.

Проверяется также частота перемагничивания якоря, которая обычно находится в пределах

$$f = \frac{pn_{н}}{60} = 10 \div 50\,гц, \quad (12\text{-}13)$$

но не более 70—75 *гц*.

Отметим, что в специализированных машинах, например в быстроходных турбогенераторах, эта частота может достигать 100—150 *гц*.

Выбранное число полюсов в дальнейшем проверяется при расчете якорной обмотки и установлении числа коллекторных пластин.

12-5. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО ЯКОРЯ

В большинстве машин общепромышленного применения применяются простые волновая или петлевая обмотки. При выборе типа обмотки необходимо учесть, что с точки зрения меньшей трудоемкости, стоимости изготовления и лучшего использования активных материалов желательна обмотка с меньшим числом проводников. В этом случае уменьшается объем требуемой для обмотки изоляции, снижаются размеры пазов, что дает возможность взять большую ширину зубцов и сделать более коротким сердечник якоря. Из формулы для э. д. с. машины постоянного тока

$$E_{ан} = \frac{pn_{н}N}{60a}\Phi \cdot 10^{-8}\,в \quad (12\text{-}14)$$

следует, что при заданных величинах $E_{ан}$, $n_{н}$, $p\Phi$ минимальное число проводников якоря N при простой волновой обмотке, имеющей $a=1$, составит:

$$N = \frac{60aE_{ан}\cdot 10^{8}}{pn_{н}\Phi}, \quad (12\text{-}14а)$$

где Ф — магнитный поток, *мкс*.

Эта обмотка обладает еще тем преимуществом, что не требует уравнительных соединений.

Возможность применения простой волновой обмотки ($a=1$) проверяется в первую очередь по значению тока в параллельной ветви; это значение в обычных случаях не должно превышать 250 (300) *а*:

$$I_{ан}/2a \leqslant 250\,(300)\,a. \qquad (12\text{-}15)$$

Затем после выбора числа коллекторных пластин K при минимальном числе витков $w_с$ в секции якорной обмотки

$$w_с = N/2K \qquad (12\text{-}16)$$

проверяется среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами:

$$U_{к.ср} = \frac{2pU_н}{K}. \qquad (12\text{-}17а)$$

Для нормальных машин без компенсационной обмотки допускается $U_{к.\,ср} \leqslant 15 \div 16$ *в*; для машин с компенсационной обмоткой можно принять $U_{к.\,ср} \leqslant 20$ *в*. Только в малых машинах ($P \leqslant 1$ *квт*) $U_{к.\,ср}$ можно повысить примерно до 25—30 *в*.

В дальнейшем расчете для машин без компенсационной обмотки необходимо проверить при нагрузке максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами

$$U_{к.макс} = \frac{U_{к.ср}}{\alpha_\delta} k_{иск}, \qquad (12\text{-}17б)$$

где $k_{иск}$ — коэффициент искажения кривой поля при нагрузке,

$$k_{иск} = \frac{B_{\delta макс}}{B_{\delta н}}; \qquad (12\text{-}18)$$

$B_{\delta макс}$ и $B_{\delta н}$ — максимальное и среднее (на протяжении полюсной дуги b_δ) значения магнитной индукции в воздушном зазоре; значение $B_{\delta макс}$ определяется по переходной характеристике при номинальном токе якоря (см. § 6-8), значение $B_{\delta н}$ — по значению потока полюса при номинальной э. д. с. якоря $E_{ан}$.

Следует иметь в виду, что в машинах, работающих при ослабленном поле (например, в двигателях с диапазоном регулирования скорости вращения 1:3 и 1:4 путем уменьшения тока возбуждения), коэффициент искажения достигает значений, равных двум и более.

Допустимые величины $U_{к.\,макс}$ приведены в табл. 12-7.

Таблица 12-7

Допустимые значения максимального напряжения $U_{к\text{-}макс}$ между соседними коллекторными пластинами

Данные машины	$U_{к.\,макс}$, *в*
Мощность до 30 *квт*, напряжение до 500 *в*, число полюсов $2p=4$, регулирование скорости вращения ослаблением поля	50—60
Мощность до 200 *квт*, напряжение до 500 *в*, число полюсов $2p=4$, регулирование скорости вращения ослаблением поля	30—40
Быстроходные машины ($n \geqslant 3\,000$ *об/мин*), мощность до 800 *квт*, число полюсов $2p=4$, напряжение до 800 *в*	35—40
Мощность $P \geqslant 200$ *квт*, число полюсов $2p > 4$, напряжение до 1 500 *в*	25—30
Машины с $2p=2$. Высоковольтные машины с током якоря до 10 *а*, напряжением до 10 000 *в*	100

При окончательном выборе K следует иметь в виду допустимые минимальные значения коллекторного деления и ширины коллекторной пластины, а также допустимую окружную скорость коллектора (§ 12-6).

Если условие (12-15) не выполняется или значения $U_{к.\,ср}$ и $U_{к.\,макс}$ по (12-17а) и (12-17б) превышают указанные пределы, то переходят к простой петлевой обмотке ($2a=2p$), применяемой обычно при

$$I_{ан} \geqslant 600\,a. \qquad (12\text{-}19)$$

К сложной волновой обмотке, имеющей $1 < a < p$ и являющейся промежуточной между простой волновой и простой петлевой обмотками, обращаются в том случае, если, во-первых, коллекторные пластины оказались слишком тонкими из-за большого их числа при простой петлевой обмотке и, во-вторых, при преуменьшенном значении тока параллельной ветви. Для сложной волновой обмотки рекомендуются следующие пределы тока в параллельной ветви:

$$100 \leqslant \frac{I_{ан}}{2a} \leqslant 250 \div 300\,a. \qquad (12\text{-}19а)$$

Число ходов m сложной волновой обмотки проверяют по допустимому значению $U_{к.макс}$ (табл. 12-7) при минимально возможном значении K и с учетом рекомендаций, указанных в гл. 3.

Сложные петлевые обмотки с $a = mp$ применяются в том случае, если при простых петлевых обмотках значения $U_{к.макс}$ по (12-17б) получаются завышенными по сравнению с данными практики (табл. 12-7). В настоящее время применяются двухходовые петлевые обмотки ($m=2$) и в редких случаях трехходовые ($m=3$). Как отмечалось (гл. 3), многоходовые петлевые обмотки могут быть однократно- и g-кратнозамкнутые, где g — общий наибольший делитель чисел K и m.

Ряд фирм: «Электросила» (Ленинград), Сименс-Шуккерт (ФРГ) и др., предпочитает применять однократнозамкнутые двухходовые обмотки. Для этих обмоток достаточно выполнить условие симметрии (3-34) и (3-35), если $Z/2p \geqslant 13{,}5$.

Наконец, выбор лягушечьей обмотки, более сложной в изготовлении и ремонте, будет зависеть от следующих ее особенностей. Лягушечья обмотка, имеющая увеличенное число параллельных ветвей, выполняется из проводов небольших сечений. Эта обмотка не нуждается в уравнительных соединениях. Поэтому ее применение выгодно, во-первых, в высокооборотных машинах, требующих из-за большой частоты перемагничивания подразделенных, транспонированных проводников, и, во-вторых, в машинах с высокой окружной скоростью, в которых усложняется крепление на якоре уравнительных соединений, являющихся необходимой принадлежностью петлевых обмоток.

Для выбора типа обмотки определяется предварительное значение номинального тока якоря $I_{ан}$:

$$\left.\begin{aligned} &\text{для генераторов} \\ &I_{ан} = \frac{P_н}{U_н}(1 + k_в); \\ &\text{для двигателей} \\ &I_{ан} = \frac{P_н}{\eta_н U_н}(1 - k_в), \end{aligned}\right\} \qquad (12\text{-}20)$$

где $k_в$ — долевое значение тока возбуждения шунтовой обмотки (из табл. 12-5). При независимом возбуждении $k_в = 0$.

Выбрав тип якорной обмотки и, следовательно, число ее параллельных ветвей, определяют предварительное число проводников обмотки

$$N = \frac{A\pi D \cdot 2a}{I_{ан}}. \qquad (12\text{-}21)$$

В дальнейшем расчете устанавливается число коллекторных пластин K и пазов (зубцов) якоря Z, определяющих количество витков w_c в якорной секции по (12-16) и число секций в якорной катушке $u_п$:

$$w_c = N/2K; \quad u_п = K/Z; \qquad (12\text{-}22)$$

значение $u_п = 2, 3, 4...$

Предварительное число пазов принимается равным

$$Z = 2p\,(Z/2p), \qquad (12\text{-}23)$$

где $(Z/2p)$ заимствуется из табл. 12-8.

Таблица 12-8

Число пазов на полюс в зависимости от диаметра якоря

D, *см*	8—50	50—100	>100
$Z/2p$	8—12	10—17	17—25

При двухслойной симметричной обмотке необходимо, чтобы

$$N/Z = \text{чётное число}. \qquad (12\text{-}24)$$

Ориентировочным контролем числа Z служит зубцовое деление

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z}. \qquad (12\text{-}25)$$

Значение t_1 должно быть в пределах 1,5—2,8 *см* при $D \leqslant 30$ *см* и 2,2—3,5 *см* при $D > 30$ *см*.

Рекомендуется выбирать по возможности значение Z/p, равным нечетному числу, так как при этом улучшаются условия коммутации. Кроме того, уменьшаются пульсации поля, возникающие при перемещении зубцов под полюсами и вызывающие трансформаторную э. д. с. в коммутируемых секциях.

Затем проверяется при заданном значении A «полный ток паза»

$$\frac{A\pi D}{Z} = At_1. \qquad (12\text{-}26)$$

По условиям коммутации необходимо иметь:

при $D \leqslant 100$ *см* $At_1 \leqslant 1\,500 \div 1\,600\,a$;
при $D > 100$ *см* $At_1 \leqslant 2\,000\,a$.

Далее задаются рядом значений $u_п$ и рассчитывают K и w_c по (12-22). Составляется таблица вариантов (табл. 12-9).

Таблица 12-9

Выбор варианта K, $u_п$ и w_c

№ варианта	$u_п$	$K = u_п Z$	$w_c = N/2K$	$U_{к.\,ср}$
1				
2				
—				

Принимается вариант, удовлетворяющий допустимому напряжению $U_{к.\,ср}$ при минимальном числе витков w_c, т. е. при наибольшем допустимом числе коллекторных пластин K. Но при большом K ширина коллекторной пластины может оказаться недопустимо малой (§ 12-6), что ограничивает повышение K.

Выбирая значения $u_п$, следует учитывать, что возрастание $u_п$, с одной стороны, уменьшает трудоемкость изготовления и расход пазовой (корпусной) изоляции, но, с другой стороны, может привести к ухудшению коммутации из-за увеличения ширины коммутационной зоны сверх допустимой (§ 12-12).

Окончательные значения N, K и Z согласуются с остальными требованиями, предъявляемыми к обмоткам машин постоянного тока (см. гл. 3).

Шаги обмотки выбираются согласно указаниям § 3-1—3-4. Укорочение шага принимается с учетом допустимой ширины коммутационной зоны и обычно положительным (§ 12-9). Если укорочение шага чрезмерно увеличивает ширину коммутационной зоны, то переходят на удлиненный шаг ($\varepsilon_к < 0$).

Поперечное сечение эффективного проводника обмотки якоря определяется по плотности тока Δ_a:

$$s_a = \frac{I_{ан}}{2a\Delta_a},\ мм^2. \qquad (12\text{-}27)$$

Допустимая плотность тока определяется в зависимости от класса нагревостойкости изоляции по значению произведения $A\Delta$ из графика рис. 12-3:

$$\Delta_a = \frac{A\Delta}{A},\ а/мм^2, \qquad (12\text{-}28)$$

где A — линейная нагрузка якоря, пересчитанная в соответствии с выбранным числом проводников N;

$$A = \frac{NI_{ан}}{2a\pi D}. \qquad (12\text{-}29)$$

Для класса нагревостойкости, не указанного в графике рис. 12-3, значение $A\Delta$ находят из условия, что превышение температуры обмотки пропорционально удельной тепловой нагрузке (1-16) якоря; например, по известному значению $(A\Delta)_А$ для класса изоляции А значение $(A\Delta)_Н$ для класса Н определится из соотношения

$$\frac{\Theta_Н}{\Theta_А} \approx \frac{\rho_Н (A\Delta)_Н}{\rho_А (A\Delta)_А}, \qquad (12\text{-}30)$$

где $\Theta_Н$, $\Theta_А$ — допускаемые превышения температуры для изоляции классов Н и А соответственно;

$\rho_Н$, $\rho_А$ — удельное электрическое сопротивление проводника при допускаемых температурах нагрева $\vartheta_Н$ и $\vartheta_А$ для классов Н и А соответственно.

Искомое значение $(A\Delta)$ по (12-29) составит:

$$(A\Delta)_Н = (A\Delta)_А \frac{\Theta_Н \rho_А}{\Theta_А \rho_Н}. \qquad (12\text{-}30а)$$

Допустимая плотность тока обычно находится в пределах

$$4 < \Delta_a < 10\ а/мм^2.$$

Для якорей с полузакрытыми пазами ($D \leqslant 20$ *см*) выбирается круг-

Таблица 12-10

Ориентировочные значения высоты паза и элементарного проводника

Частота перемагничивания, *гц*	100—150	75	50	25	20	15
Высота паза, *мм*	35	40	45	52	56	60
Высота элементарного проводника, *мм*	3,9	6,4	6,9—7,4	9,3	10,8	11,6

лый изолированный проводник обычно диаметром, не превышающим 1,81 *мм* (сечение 2,57 *мм*²), для облегчения его укладки в пазы. Если требуется большее сечение, то эффективный проводник составляется

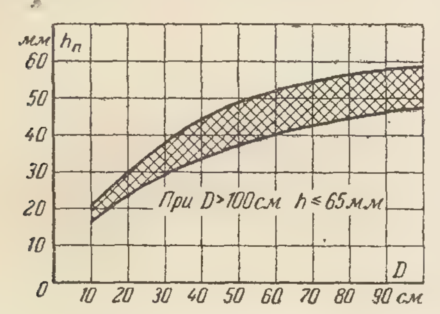


Рис. 12-8 Высота паза (зубца) в зависимости от диаметра якоря.

из двух — пяти элементарных проводников. При открытых пазах ($D>$ >20 *см*) применяется медь прямоугольного сечения, обычно превышающего 5—6 *мм*². В этом случае проводник большого сечения с целью уменьшения добавочных потерь также составляется из элементарных проводников, обычно двух, располагаемых по высоте паза. Ориентировочные значения высот паза и каждого из двух элементарных проводников, составляющих один эффективный, приведены в табл. 12-10 в зависимости от частоты перемагничивания.

Окончательные размеры проводника уточняются по данным приложения IV.

При выборе размеров паза предварительно задаются высотой паза (зубца), пользуясь для этой цели графиком рис. 12-8.

Пазы выполняются обычно открытыми, что уменьшает индуктивность секции якоря, облегчает коммутацию и позволяет получить более надежную изоляцию. Только в малых машинах при $D \leqslant 19,5$ *см* прибегают к полузакрытым пазам с параллельными стенками зубцов, что позволяет выбрать приемлемую толщину зубца, не допускающую чрезмерного повышения магнитного напряжения в зубцовом слое, и получить достаточное поперечное сечение паза. Следует иметь в виду, что чем больше линейная нагрузка A, тем более глубоким должен быть паз при выбранной плотности тока проводников. При открытых пазах обмотка выполняется с жесткими, заранее отформованными секциями. Для таких якорей с $D \geqslant 21$ *см*, сердечник якоря выполняется с аксиальными вентиляционными каналами. При полузакрытых пазах применяется всыпная обмотка из мягких секций.

Для уменьшения шума и пульсаций магнитного потока при открытых пазах применяют скос пазов на 0,5—1 зубцовое деление. В машинах серии П скос пазов на одно зубцовое деление выполняется только для типоразмеров 7-го, 8-го и 9-го габаритов. Ширина паза (средняя для полузакрытых пазов) составляет примерно 0,4—0,5 зубцового деления по окружности, проходящей через середину высоты паза. Определяющим ширину паза размером является минимальная толщина зубца $b_{z\text{мин}}$, которая зависит от допускаемой максимальной индукции $B_{z\text{макс}}$ (табл. 12-3).

Крепление обмотки при полузакрытых пазах осуществляется клином толщиной 2—3 *мм*, при открытых пазах — проволочными бандажами или клином толщиной, равной или большей 3 *мм* (при окружной скорости якоря, равной или боль-

шей 35 *м/сек*). Число бандажных канавок принимается равным двум-трем при глубине 1,5—3 *мм*, ширине 20—25 *мм* с суммарной шириной, не превышающей 30% длины якоря. Бандажи и клинья при открытых пазах проверяются на механическую прочность (см. § 9-8, *б*); лобовые части обмотки крепятся бандажами также с соответствующей проверкой их механической прочности.

Окончательно размеры полузакрытого паза устанавливаются по размещению в пазу проводников и изоляции с учетом коэффициента заполнения паза (см. § 4-5). Окончательные размеры открытого паза определяются после укладки в паз проводников и изоляции с учетом места, занимаемого бандажами или клином. При окружных скоростях якоря выше 45 *м/сек* необходимо проверить минимальную толщину зубца на механическую прочность.

После выбора размеров паза и зубца определяется внутренний диаметр якоря

$$D' = D - 2(h_z + h_a) - \frac{m_к d_к}{3}, \quad (12\text{-}31)$$

где h_a — расчетная высота ярма якоря;

$m_к$, $d_к$ — число рядов и диаметр аксиальных вентиляционных каналов при аксиальной вентиляции;

h_z — высота зубца.

Величина h_a определяется магнитной индукцией B_a в ярме якоря, выбираемой по данным табл. 12-3:

$$h_a \approx \frac{\Phi}{2k_c l B_a}, \; см. \quad (12\text{-}32)$$

При $D \leqslant 59$ *см* пакеты якоря напрессовываются непосредственно на вал машины, и в этом случае внутренний диаметр D' якоря равен среднему диаметру вала d_c, т. е. $D' = d_c$.

Величина d_c предварительно рассчитывается по (9-2). При $D \leqslant 19{,}5$ *см* аксиальные каналы не применяются из-за невозможности получить достаточный диаметр канала ($d_к \geqslant 1{,}7$ *см*). При малых значениях $d_к$ действие каналов становится неэффективным. При $D \leqslant 36{,}8$ *см* применяется один ряд аксиальных каналов ($m_к = 1$) диаметром $d_к = 1{,}7 \div 2$ *см*; при больших диаметрах якоря число каналов удваивается ($m_к = 2$).

В крупных машинах между внутренним диаметром ярма якоря и диаметром вала располагают промежуточную втулку, якорную звезду и т. п. [Л. 8].

12-6. КОЛЛЕКТОР И ЩЕТКИ

При выборе размеров коллектора его диаметр принимают меньше диаметра якоря. Обычно

$$D_к = (0{,}6 \div 0{,}85) D. \quad (12\text{-}33)$$

Контролем величины $D_к$ служит требование достаточной толщины коллекторной пластины, т. е. требование достаточного размера коллекторного деления $t_к$. При $D \leqslant 50$ *см* обычно выбирают значение $t_к = 3 \div 8$ *мм*, при $D > 50$ *см* $t_к > 5$ *мм*.

Диаметр коллектора для снижения веса последнего и стоимости выбирается относительно небольшой. Поэтому начиная с $D > 21$ *см* концы якорных секций соединяются с коллекторными пластинами через петушки; при $D \leqslant 19{,}5$ *см* соединение обмотки якоря с коллектором осуществляется непосредственно. Для унификации производства на отечественных заводах диаметры коллекторов нормализованы (табл. 12-11).

Для спокойной работы коллекторного узла окружная скорость коллектора нормальных машин не должна превосходить 35 *м/сек*.

В крупных машинах с тяжелыми условиями коммутации петушки выполняют роль уравнительных соединений. В этом случае принимают $D_к = D - (0{,}9 \div 1{,}2)\tau$. В машинах низкого напряжения на большие токи («многоамперных») с очень большим коллекторным делением ($t_к \geqslant 12$ *мм*) выполняют одну коллекторную пластину из двух частей.

Толщина изоляции между коллекторными пластинами принимается равной 0,6—1,2 *мм* (1,2 *мм* для крупных машин на относительно высокие напряжения), обычно же принимают 0,8 или 1 *мм*.

Таблица 12-11

Нормализованные диаметры коллекторов (*см*)

5,2	8	10	12,5	15	18	20	23	25	30	35	40	46	50
53	63	80	100	115	130	160	190	210	220	250	280	315	

Длина коллектора зависит от числа щеток и их размеров. Выбрав по табл. 2-8 марку щеток, определяют суммарную площадь щеточного контакта на коллекторе:

$$\Sigma s_{щ} \geqslant \frac{2I_{ан}}{\Delta_{щ}}, см^2, \qquad (12\text{-}34)$$

где $\Delta_{щ}$ — допустимая плотность тока щеточного контакта, *а/см²*.

С целью уменьшения длины коллектора ширина щетки выбирается возможно большей, но в пределах допустимой ширины коммутационной зоны (§ 12-12). С учетом этого ограничения рекомендуется следующая величина щеточного перекрытия [Л. 88]:

а) при простых петлевых обмотках

$$\beta_{щ} = b_{щ}/t_{к} \geqslant u_{п} + 0{,}5; \qquad (12\text{-}35а)$$

б) при простых волновых обмотках

$$\beta_{щ} = b_{щ}/t_{к} \approx 2 \div 4, \qquad (12\text{-}35б)$$

где $b_{щ}$ — ширина щетки.

При сложных (многоходовых) обмотках дополнительно требуется выполнить условие $\beta_{щ} \geqslant m+1$, где m — число ходов обмотки.

В машинах средней мощности ширина щетки лежит в пределах 8—15 *мм*. Для улучшения скользящего контакта длину щетки $l_{щ}$ выбирают относительно небольшой. В машинах средней мощности $l_{щ}$ лежит в пределах 10—25 *мм*.

Окончательный размер $l_{щ}$ устанавливается по ГОСТ 12232-66 (приложение V).

По выбранным размерам щетки устанавливается число щеток на болт

$$N'_{щ} \geqslant \frac{\Sigma s_{щ}}{2pb_{щ} l_{щ}}. \qquad (12\text{-}36)$$

Значение $N'_{щ}$ округляют до ближайшего целого. В малых машинах обычно берут не меньше двух щеток на болт до обеспечения более надежного контакта.

Размещение щеток на коллекторе и полная его длина устанавливаются в соответствии с указаниями, приведенными в § 9-11. Отметим, что в нормальных машинах при $D \leqslant 19{,}5$ *см* коллекторы выполняются на пластмассе, а при $D \geqslant 21$ *см* — арочного типа на разъемной втулке.

12-7. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

Для того чтобы поле в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги не изменяло знака (направления), необходимо выполнить условие

$$0{,}5Ab_{\delta} \leqslant \frac{1}{2}(F_{\delta н} + F_{zн}), \qquad (12\text{-}37)$$

где A — линейная нагрузка якоря при номинальной нагрузке;

$F_{\delta н}$, $F_{zн}$ — магнитные напряжения воздушного зазора и зубцового слоя при номинальной нагрузке.

Принимая ориентировочно $F_{zн} \approx (0{,}15 \div 0{,}25) F_{\delta н}$ и учитывая связь между $F_{\delta н}$ и магнитной индукцией $B_{\delta н}$ в воздушном зазоре по (6-20), получаем из (12-37) следующую формулу для выбора воздушного зазора:

$$\delta \geqslant \varkappa_{\delta} \frac{Ab_{\delta}}{B_{\delta н}}, \qquad (12\text{-}38)$$

где $\varkappa_{\delta} = 0{,}46 \div 0{,}50$ — при полузакрытых пазах якоря;

$\varkappa_{\delta} = 0{,}43 \div 0{,}46$ — при открытых пазах с пазовыми клиньями;

$\varkappa_{\delta} = 0{,}35 \div 0{,}40$ — при открытых пазах с проволочными бандажами.

Формула (12-38) пригодна для некомпенсированных машин нормального исполнения. Ее можно также применить для некомпенсированных двигателей с $P_н \leqslant 100$ *квт* с регулированием скорости вращения путем изменения магнитного потока при отношении скоростей высшей и низшей $n_{н(в)} : n_{н(н)} = 1{,}5 \div 1{,}7$. Если эти пределы выше, то зазор принимается

$$\delta_{р.д} = \delta \frac{n_{н(в)}}{n_{н(н)}}, \qquad (12\text{-}39)$$

где $\delta_{р.д}$ — воздушный зазор регулируемого двигателя;
δ — зазор по (12-38) при $\varkappa_\delta = 0{,}35 \div 0{,}40$.

В двигателях с более широкими пределами регулирования скорости (например, 3 : 1 и 4 : 1) целесообразно несколько снизить линейную нагрузку якоря A. В этом случае, хотя главные размеры машины увеличиваются, уменьшение воздушного зазора в соответствии с (12-38) приведет к снижению объема меди обмотки возбуждения и соответственно к ограничению наружного диаметра при обеспечении устойчивой работы машины.

Для более мощных двигателей (при $P_н > 100 \div 150$ *квт*) с широким диапазоном регулирования скорости (2,5 : 1 и более) путем изменения магнитного потока приходится применять компенсационную обмотку. В таких машинах при $D < 50$ *см* зазор определяется по (12-38) при $\varkappa_\delta = 0{,}43 \div 0{,}46$. В компенсированных машинах при $D > 50$ *см* рекомендуется для определения зазора эмпирическая формула:

$$\left.\begin{array}{l} \text{для } D = 50 \div 100\,см \\ \delta = 0{,}002D + (0{,}35 \div 0{,}4)\,см; \\ \text{для } D = 100 \div 200\,см \\ \delta = 0{,}002D + (0{,}3 \div 0{,}35)\,см. \end{array}\right\} \qquad (12\text{-}40)$$

Для обеспечения устойчивой работы двигателей с $P_н \leqslant 18$ *квт* и очень широким регулированием скорости (до 6 : 1 и 8 : 1) путем изменения магнитного потока применяется схема раздельного питания катушек параллельной обмотки возбуждения, с помощью которой магнитный поток части полюсов изменяют не только по величине, но и по знаку [Л. 89].

Следует отметить, что для всех двигателей с регулированием скорости вращения путем изменения магнитного потока главные размеры определяются для режима низшей скорости вращения.

12-8. ГЛАВНЫЕ ПОЛЮСЫ И СТАНИНА

В современных машинах постоянного тока полюсы собираются обычно из штампованных листов стали толщиной 1—2 *мм* (в машинах малой мощности — 0,5 *мм*).

Длина дуги полюсного наконечника b_p согласно выбранному выше значению $\alpha_\delta \approx \alpha_p$ составляет:

$$b_p = \alpha_p \tau. \qquad (12\text{-}41)$$

Очертание полюсного наконечника обычно выбирается таким образом, чтобы на протяжении $^2/_3\, b_p$ в его средней части воздушный зазор δ между якорем и наконечником оставался постоянным и далее при переходе к краям наконечника увеличивался примерно до $2\,\delta$.

При таком очертании получается: $b_p = b_\delta$.

Высота h'_p основания выступающих боковых концов наконечника (рис. 12-9) выбирается так, чтобы индукция в этом основании не превышала примерно 20 000 *гс*. Тогда

$$h'_p \geqslant \frac{0{,}5B_\delta\,(b_p - b_m)\,l_\delta}{20\,000 l_p}, \, см, \qquad (12\text{-}42)$$

где b_m — ширина сердечника полюса;
l_p — аксиальная длина полюсного наконечника.

Во избежание задевания катушки полюса за якорь необходимо, чтобы $h'' \geqslant 5$ *мм* (рис. 12-9).

Длина l_p полюсного наконечника, совпадающая при шихтованных полюсах с длиной полюса l_m, принимается равной длине якоря l_1 или меньшей примерно на 5 *мм*.

Ширина сердечника полюса b_m рассчитывается по потоку полюса,

который больше потока якоря примерно на 10—20% за счет потоков рассеяния. Задаваясь значением индукции B_m, определяем ширину сердечника:

$$b_m \approx \frac{(1,1 \div 1,2)\Phi}{0,98 l_m B_m} = (1,12 \div 1,22)\frac{\Phi}{l_m B_m}, \quad (12\text{-}43)$$

где 0,98 — коэффициент заполнения сечения сердечника, собранного из листовой стали толщиной 1—2 *мм*.

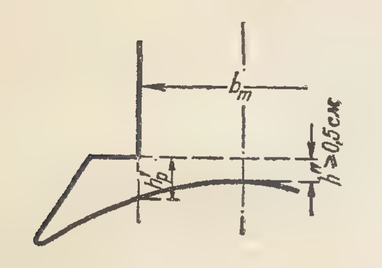


Рис. 12-9. Форма полюсного наконечника.

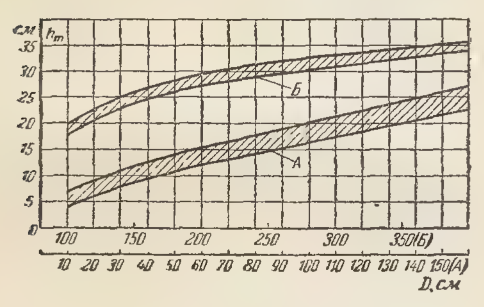


Рис. 12-10. Предварительная высота главного полюса.

Индукция B_m в сердечнике полюса выбирается в пределах 14 000—15 000 *гс*, а при холоднокатаной стали — до 17 000 *гс* (табл. 12-3). Высота полюса h_m может быть предварительно взята из графика рис. 12-10.

Окончательное значение h_m устанавливается после расчета магнитной цепи и размещения на полюсах обмотки возбуждения.

Станины машин постоянного тока изготовляются из стального литья, или из листовой стали в виде трубы, сваренной продольным швом, или из цельнотянутой стальной трубы с приваренными к ней лапами из сортового стального проката.

Чугун для станин в настоящее время не применяется.

Сечение станины S_c рассчитывается по потоку в станине, равному примерно половине потока полюса:

$$S_c = \frac{(1,1 \div 1,2)\,\Phi}{2B_c} = (0,55 \div 0,6)\,\frac{\Phi}{B_c}, \text{ см}^2, \quad (12\text{-}44)$$

где $B_c = 11\,000 \div 13\,000$ *гс* для стальной станины (табл. 12-3).

Аксиальная длина станины l_c выбирается обычно так, чтобы закрыть выступающие лобовые части обмотки возбуждения.

Ориентировочно можно принять:

$$l_c = (1,2 \div 2,0)\, l_m,$$

или

$$l_c = l_m + (8 \div 12) \text{ см}.$$

Радиальная высота станины h_c при прямоугольном ее сечении будет:

$$h_c = \frac{S_c}{l_c}, \text{ см}.$$

Наружный диаметр станины составит:

$$D_c = D + 2(\delta + h_m + h_c).$$

12-9. ПРОВЕРКА КОММУТАЦИИ И РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Проверка коммутации. Проверка состоит в определении среднего значения реактивной э. д. с. e_R, возникающей в коммутируемой секции.

Значение e_R можно определить по формуле

$$e_R = 2 w_p v_a A \xi l_\delta \cdot 10^{-6} \text{ в}, \quad (12\text{-}45)$$

где w_p — число витков в коммутируемых секциях, последовательно включенных между двумя ближайшими коллекторными пластинами;

$$\left.\begin{aligned} &w_p = w_c \text{ — для петлевых обмоток;} \\ &w_p = p w_c \text{ — для волновых обмоток.} \end{aligned}\right\} \quad (12\text{-}46)$$

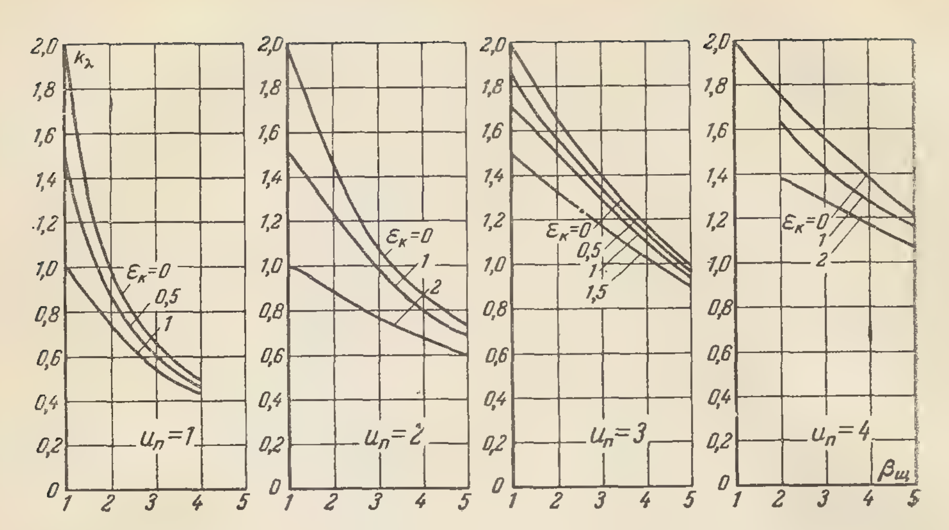


Рис. 12-11. Коэффициент k_λ для учета взаимной индуктивности коммутируемых секций.

При полном комплекте щеточных болтов, равном $2p$, берут и для волновых обмоток $w_p = w_c$;

v_a — скорость якоря, *м/сек*;

ξ — средняя удельная магнитная проводимость коммутируемой секции; определяется по формуле

$$\xi = 0{,}4\pi\left(k_\lambda \lambda_п + k_\lambda \lambda_z + \lambda_{бж} + \lambda_л\right); \qquad (12\text{-}47)$$

k_λ — коэффициент, учитывающий влияние взаимоиндуктивности коммутируемых секций. Его значение можно взять по кривым рис. 12-11 в зависимости от $\beta_щ$, $\varepsilon_к$ и $u_п$;

$\lambda_п$ — коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния по (7-23), (7-24) и (7-26), где следует принять $k_\beta = 1$ и $k'_\beta = 1$;

λ_z — коэффициент удельной проводимости потоков рассеяния по коронкам зубцов;

$\lambda_{бж}$ — коэффициент удельной проводимости потоков рассеяния через стальные бандажи для крепления обмотки якоря;

$\lambda_л$ — коэффициент удельной проводимости потоков рассеяния лобовых частей обмотки якоря.

Значение λ_z рассчитывается следующим образом:

при наличии добавочных полюсов

$$\lambda_z = 0{,}15\frac{b_{рд}}{k_{\delta д}\,\delta_д}, \qquad (12\text{-}48а)$$

где $b_{рд}$ — полюсная дуга добавочного полюса [см. (12-66)];

$\delta_д$, $k_{\delta д}$ — воздушный зазор и коэффициент воздушного зазора добавочного полюса (12-72а) и (12-73а);

при отсутствии добавочных полюсов

$$\lambda_z = 0{,}92\lg\frac{\pi t_1}{b_щ}, \qquad (12\text{-}48б)$$

где t_1 — зубцовое деление на окружности якоря;

$b_щ$ — ширина щели паза якоря.

Ориентировочное значение $\lambda_{бж}$ находим по формуле

$$\lambda_{бж} \approx \frac{30\,000 S_{бж}}{A b_{к.з}\, l_\delta}. \qquad (12\text{-}49)$$

Здесь $S_{бж}$ — полное сечение всех бандажей, наложенных по длине стали якоря, *см*²;

A — линейная нагрузка якоря, *а/см*;

$b_{к.з}$ — ширина коммутационной зоны, равная:

$$b_{к.з} = b'_щ + t'_к\left(u_п + \varepsilon_к - a/p\right), \qquad (12\text{-}50)$$

где $b'_щ = b_щ \frac{D}{D_к}$ — ширина щетки, приведенная к диаметру якоря, *см*;

$$u_п = K/Z;$$

$\varepsilon_к = \left| \frac{K}{2p} - y_1 \right|$ — укорочение шага, выраженное в коллекторных делениях (или в делениях элементарных пазов);

y_1 — первый частичный шаг обмотки якоря по (3-7);

$t'_к = t_к D/D_к$ — коллекторное деление, приведенное к диаметру якоря, *см*.

Чтобы обеспечить удовлетворительные условия коммутации, следует ограничить, как указывалось ранее (§ 12-3), проникновение магнитного поля главных полюсов в зону коммутации. Для этого рекомендуется принимать межполюсное расстояние $\tau - b_p$ равным:

$$\left.\begin{array}{c} \text{при } D \leqslant 50\ см, \\ \tau - b_p \geqslant (1{,}35 \div 2{,}0)\, b_{к.з}; \\ \text{при } D > 50\ см \\ \tau - b_p \geqslant (1{,}65 \div 2{,}0)\, b_{к.з} \end{array}\right\} \quad (12\text{-}51)$$

или

$$\tau - b_p = b_{к.з} + (5 \div 8)\ см.$$

Бо̀льшие значения $\tau - b$ относятся к бо̀льшим диаметрам якоря. Значение $\lambda_л$ определяется приближенно:

$$\lambda_л \approx (0{,}5 \div 1{,}0)\, l_л/l_\delta. \quad (12\text{-}52)$$

Щеточное перекрытие, или число коллекторных делений, перекрытых щеткой, равно:

$$\beta_щ = b_щ/t_к. \quad (12\text{-}53)$$

При укороченных в аксиальном направлении полюсных наконечниках добавочных полюсов или при отсутствии последних в коммутируемых секциях индуктируется э. д. с. e_q от поперечного поля реакции якоря, равная:

$$e_q \approx 2w_p v_a (l_\delta - l_{рд}) B_q \cdot 10^{-6},\ в, \quad (12\text{-}54)$$

где $l_{рд}$ — аксиальная длина добавочного полюса, *см* (при отсутствии добавочных полюсов $l_{рд} = 0$);

B_q — индукция в зоне коммутации от действия поперечной н. с. якоря, *гс*.

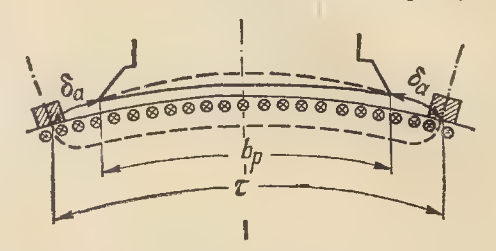


Рис. 12-12. К определению магнитной индукции B_q в поперечной оси.

Значение индукции можно определить следующим образом. Для замкнутого контура линий магнитной индукции, изображенной на рис. 12-12 пунктиром, имеем:

$$\oint H\, dl \approx 0{,}8 B_q \cdot 2\delta_q = A\tau. \quad (12\text{-}55)$$

В (12-55) падением магнитного потенциала в стальных участках контура пренебрегаем.

Принимая длину силовой линии в воздушной части контура приближенно равной

$$\delta_q \approx \frac{1}{2}(\tau - b_p),$$

находим:

$$B_q \approx 1{,}25 \frac{A}{1 - \alpha_p},\ гс. \quad (12\text{-}56)$$

Как реактивная э. д. с. e_R, так и э. д. с. вращения e_q от поперечного поля замедляют процесс коммутации.

В машинах с добавочными полюсами действия э. д. с. e_R и e_q, замедляющих коммутацию, компенсируются э. д. с. $e_к$, индуктированной в коммутируемых секциях полем добавочного полюса.

В машинах малой мощности без добавочных полюсов, если щетки расположены на геометрической нейтрали, для обеспечения удовлет-

ворительной коммутации должно быть выполнено условие

$$e_R + e_q \leqslant 2 \div 3\ в. \qquad (12\text{-}57)$$

Расчет добавочных полюсов. Поле добавочных полюсов рассчитывают так, чтобы не только компенси-

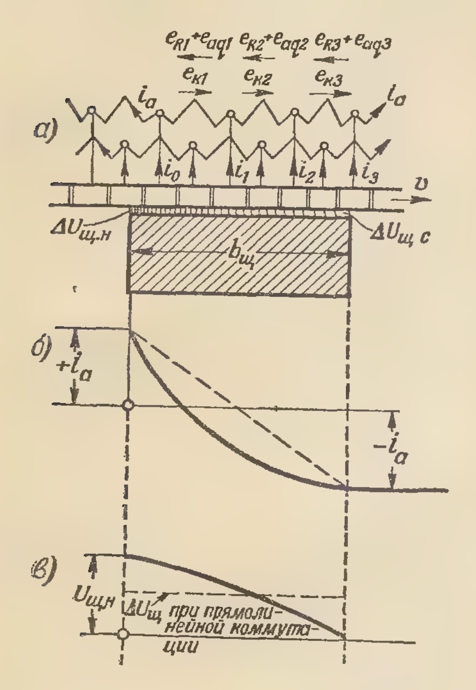


Рис. 12-13. К расчету коммутации.

ровать действие суммы э. д. с. $e_R + e_q$, но и создать небольшое ускорение коммутационного процесса, что благоприятно действует на работу скользящего контакта щетки.

Определим индукцию $B_к$ в воздушном зазоре добавочного полюса, которая могла бы создать ускоренную коммутацию.

На рис. 12-13, *а* схематически показаны коммутируемые секции в общем случае множественной обмотки якоря, имеющей при $2p$ полюсах число параллельных ветвей $2a = m2p$ (на рис. 12-13 $m = 2$).

Ширина щетки, перекрывающей $\beta_щ$ коллекторных делений, равна:

$$b_щ = \beta_щ t_к.$$

Составим уравнение напряжений для замкнутого контура, содержащего n последовательно включенных секций, замкнутых щеткой. При обходе контура (рис. 12-13, *а*) мы суммируем, с одной стороны, э. д. с. $e_{к1}$, e_{R1}, e_{q1}, $e_{к2}$, e_{R2}, e_{q2} и т. д., с другой стороны, падения напряжения под набегающим и сбегающим краями щетки:

$$(e_{к1} - e_{R1} - e_{q1}) + (e_{к2} - e_{R2} - e_{q2}) + \cdots + (e_{кn} - e_{Rn} - e_{qn}) = \Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с}, \qquad (12\text{-}58)$$

где $e_{кn}$ — коммутирующая э.д.с., индуктированная полем добавочного полюса в n-й секции, находящейся под сбегающим краем щетки;

e_{Rn} — реактивная э. д. с. в той же секции;

e_{qn} — э. д. с. от поперечного поля реакции якоря в n-й секции;

$\Delta U_{щ.н}$ — падение напряжения в щеточном контакте под набегающим краем щетки.

$\Delta U_{щ.с}$ — падение напряжения в щеточном контакте под сбегающим краем щетки.

Падением напряжения в омическом сопротивлении секций, соединительных проводников и самой щетки пренебрегаем.

Левую часть уравнения (12-58) можно представить в виде

$$\sum_{x=1}^{x=n} (e_{кx} - e_{Rx} - e_{qx}) = n\,(e_к - e_R - e_q), \qquad (12\text{-}59)$$

где $e_к$ — среднее значение коммутирующей э. д. с.;

e_R — среднее значение реактивной э. д. с.;

e_q — среднее значение э. д. с. от поперечного поля реакции якоря.

Значение $e_к$ определяется по формуле

$$e_к = 2w_p v_a l_{рл} B_к \cdot 10^{-6}\ в, \qquad (12\text{-}60)$$

где $B_к$ — среднее значение индукции в воздушном зазоре под добавочным полюсом, *гс*;

v_a — окружная скорость якоря, *м/сек*.

Значения e_R и e_q рассчитываются по формулам (12-45) и (12-54); n — число секций, закороченных щеткой и принадлежащих одной из «простых» обмоток якоря рассматриваемой множественной обмотки: $n = \beta_щ / m$.

Совместным решением уравнений (12-59) и (12-60) определяем значение $B_к$:

$$B_к = \xi A + B_q \frac{l_\delta - l_{рд}}{l_{рд}} + \frac{(\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с})\, m}{2w_p v_a l_{рд} \beta_щ} \cdot 10^6 = B'_к + B''_к + B'''_к, \text{ гс.} \quad (12\text{-}61)$$

Здесь все размеры в сантиметрах; v_a — в *м/сек.*

Аксиальную длину добавочного полюса обычно выбирают равной длине якоря

$$l_{рд} = l_1. \quad (12\text{-}62)$$

В этом случае в (12-61) вторая составляющая индукции будет равна нулю.

При прямолинейной коммутации, как это видно из потенциальной кривой под щеткой (рис. 12-13, *в*), имеем $\Delta U_{щ.н} = \Delta U_{щ.с}$. Тогда в (12-61) третья составляющая индукции будет равна нулю.

При ускоренной коммутации $\Delta U_{щ.н} > \Delta U_{щ.с}$. Для получения ускоренной коммутации с нулевой плотностью тока (рис. 12-13, *в*) значение $\Delta U_{щ.с}$ должно быть равно нулю. Тогда третья составляющая индукции в (12-61) будет:

$$B'''_к = \frac{\Delta U_{щ.н}\, m \cdot 10^6}{2w_p v_a l_{рд} \beta_щ}.$$

Учитывая (12-46) и (3-21), получаем в общем случае:

$$B'''_к = \frac{\Delta U_{щ.н}\, a \cdot 10^6}{2w_с v_a l_{рд} p \beta_щ}. \quad (12\text{-}63)$$

При выполнении условия (12-62) индукция под добавочным полюсом, обеспечивающая ускоренную коммутацию с нулевой плотностью тока под сбегающим краем щетки, будет равна:

$$B_к = \xi A + \frac{\Delta U_{щ.н}\, a \cdot 10^6}{2w_с v_a l_\delta p \beta_щ}. \quad (12\text{-}64)$$

В общем случае ускоренной коммутации при выполнении (12-62) будем иметь для значения $B_к$:

$$B_к = \xi A + \frac{(\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с})\, a \cdot 10^6}{2w_с v_a l_\delta p \beta_щ}. \quad (12\text{-}65)$$

Добавочные полюсы рекомендуется рассчитать на ускоренную коммутацию таким образом, чтобы разность падений напряжения $\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с}$ составляла:

при угольных щетках $\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с} = 2{,}0 \div 0{,}75$ *в*;

при медно-угольных щетках $\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с} = 0{,}65 \div 0{,}35$ *в*.

Значение составляющей $B'''_к$ равно примерно 20—40% значения основной составляющей $B'_к$.

Число добавочных и главных полюсов принимают одинаковым.

После определения $B_к$ выбирают размеры добавочного полюса. Длину полюсной дуги наконечника принимают равной

$$b_{рд} \approx (0{,}65 \div 0{,}75)\, b_{к.з}. \quad (12\text{-}66)$$

Для уменьшения пульсаций поля добавочного полюса рекомендуется брать размер $b_{рд}$ кратным t_1.

Как упоминалось выше, длину полюсного наконечника $l_{рд}$ принимают обычно равной полной длине якоря.

Поток $\Phi_д$ воздушного зазора добавочного полюса будет равен:

$$\Phi_д = B_к b_{рд} l_{рд}. \quad (12\text{-}67)$$

Чтобы определить сечение сердечника добавочного полюса, первоначально находим поток рассеяния добавочных полюсов:

$$\Phi_{\sigma д} = F_д l_{рд} \lambda_{\sigma д}, \quad (12\text{-}68)$$

где $F_д$ — намагничивающая сила на пару добавочных полюсов, предварительно $F_д = (1{,}2 \div 1{,}3)\, A\tau$;

$\lambda_{\sigma д}$ — удельная проводимость для потока рассеяния, приближенно равная

$$\lambda_{\sigma д} \approx \frac{H'}{L'} + \frac{H''}{L''} + 0{,}75 \frac{H'''}{L'''}. \quad (12\text{-}68а)$$

Обозначения размеров даны на рис. 12-14.

Величина потока в сердечнике полюса составит:

$$\Phi_{mд} = \Phi_д + \Phi_{\sigma д}. \quad (12\text{-}69)$$

Коэффициент рассеяния добавочных полюсов равен:

$$\sigma_д = \Phi_{mд}/\Phi_д. \qquad (12\text{-}69а)$$

Для машин без компенсационной обмотки $\sigma_д = 2{,}5 \div 3{,}5$; при наличии компенсационной обмотки $\sigma_д \approx 2$. Желательно, чтобы поток $\Phi_{mд}$ не

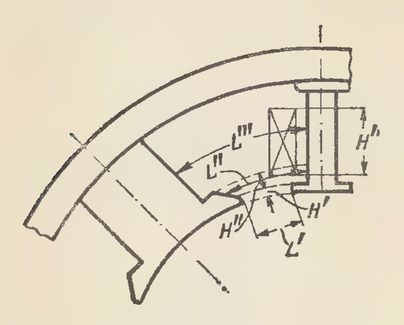


Рис. 12-14. К определению магнитного рассеяния добавочных полюсов.

превышал 10—12% полного потока главных полюсов Φ_m. В противном случае следует учесть взаимное влияние этих потоков. Для предварительной оценки этого влияния определяют максимальные индукции в ярмах якоря и станины при перегрузке машины.

Принимая допускаемую перегрузку по току якоря полуторакратной (по ГОСТ 183-66), определяем:

для ярма якоря

$$B_{a\,макс} = \frac{\Phi + 1{,}5\,\Phi_д}{2S_a};$$

для ярма станины

$$B_{с.макс} = \frac{\Phi_m + 1{,}5\,\Phi_{mд}}{2S_c}. \qquad (12\text{-}70)$$

Эти индукции не должны превышать 16 000 *гс*.

Сечение сердечника добавочного полюса определяется по формуле

$$S_{mд} \geqslant \frac{\Phi_{mд}}{B_{mд}}, \qquad (12\text{-}71)$$

где $B_{mд}$ выбирают из условия

$$B_{mд} \leqslant B_{mд.макс}\frac{I_н}{I_{макс}}.$$

В зависимости от материала сердечника принимают:

для стали Ст. 3 и Э11 $B_{mд.\,макс} \leqslant 13\,000$ *гс*;
для стали Э32 и Э330 $B_{mд.\,макс} \leqslant 17\,000$ *гс*.

Длину сердечника добавочного полюса $l_{mд}$ берут обычно равной полной длине якоря.

Ширина сечения сердечника составит:

$$b_{mд} = \frac{S_{mд}}{l_{mд}} \qquad (12\text{-}72)$$

Длину сердечника $l_{mд}$ в машинах с $D > 37$ *см* принимают обычно равной полной длине якоря, с $D \leqslant 35$ *см* иногда $l_{mд}$ берут на 8—12 *мм* меньше $l_{рд}$ с целью получения уступа для опоры катушки полюса.

В машинах при $D \geqslant 100$ *см* сердечник добавочного полюса часто собирается из листовой стали. При этом необходимо учесть увеличение аксиальной длины сердечника из-за неплотности прилегания листов. Кроме того, ширину сердечника по мере приближения к поверхности якоря обычно уменьшают в соответствии с уменьшением потока рассеяния сердечника.

Воздушный зазор между добавочным полюсом и якорем $\delta_д$ выбирают немного больше зазора δ под главными полюсами. Рекомендуется брать [Л. 88]:

для машин с $D \leqslant 50$ *см* $\delta_д \approx (0{,}012 \div 0{,}01)\,D$;

для машин с $D > 50$ *см*, $\delta_д \approx (0{,}005 \div 0{,}007)\,D$. (12-72а)

Следует отметить, что чем больше $\delta_д$, тем в большей степени сохраняется пропорциональная зависимость $B_к$ от тока якоря и тем меньше влияние зубчатости якоря на пульсации индукции $B_к$.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения на пару добавочных полюсов некомпенсированной машины составит:

$$F_д \approx 1{,}1 \cdot 0{,}8\,B_к \cdot 2k_{\delta д}\,\delta_д + A\tau. \qquad (12\text{-}73)$$

Здесь $k_{\delta д}$ — коэффициент воздушного зазора добавочного полюса,

$$k_{\delta д} \approx \frac{t_1 + 10\,\delta_д}{(t_1 - b_ш) + 10\,\delta_д}, \qquad (12\text{-}73а)$$

где t_1 — зубцовое деление якоря;
$b_ш$ — щель паза якоря; при открытых пазах $b_ш = b_п$.

Коэффициент 1,1 в (12-73) учитывает насыщение стали магнитной цепи.

При этом предполагается, что суммарные магнитные индукции в станине и ярме якоря, где магнитные потоки главных и добавочных полюсов складываются, не превышают при перегрузках машины 15 000—16 000 *гс*.

При наличии компенсационной обмотки н. с. $F_д$ уменьшается на величину н. с. компенсационной обмотки $F_к$ (§ 12-13).

Число витков катушки возбуждения добавочного полюса найдем по формуле

$$w_д = \frac{F_д a_д}{2I_{ан}}, \qquad (12\text{-}74)$$

где $a_д$, равное 1 или 2, — число параллельных ветвей обмотки. Округляют $w_д$ до ближайшего целого числа.

Катушки полюсов соединяют последовательно. И только в машинах на большую силу тока включают их в параллельные ветви (не более двух; см. § 12-13).

Если при округлении $w_д$ н.с. $F_д$ заметно отличается от полученной величины по (12-73), то следует изменить воздушный зазор $\delta_{д.п}$, чтобы сохранить значение индукции $B_к$.

В машинах на большие токи с малым значением витков $w_д$ не следует брать $w_д$ дробным, так как в этом случае н.с. добавочных полюсов будет влиять на главное поле машины.

Размеры поперечного сечения проводника обмотки выбираются по допустимой плотности тока согласно данным § 12-12. Указания о конструктивном исполнении обмотки приводятся в гл. 5.

После вычерчивания эскиза катушки определяется средняя длина витка обмотки $l_{в.д}$ [см. (12-98)]. Общая длина меди обмотки добавочных полюсов составит:

$$L_д = 2pw_д l_{в.д},\ см,$$

где $l_{в.д}$ взято в сантиметрах; вес меди добавочных полюсов

$$G_д = 8{,}9\, L_д a_д s_д \cdot 10^{-5},\ кг.$$

Здесь $s_д$ — поперечное сечение проводника, *мм²*.

Сопротивление обмотки добавочных полюсов при $\vartheta°$ С

$$r_{д\vartheta} = \frac{L_д}{\gamma_\vartheta a_д^2 s_д},\ ом, \qquad (12\text{-}75)$$

где γ_ϑ — удельная электропроводимость нагретой меди из табл. 11-8.

Для уменьшения потока рассеяния добавочного полюса катушки возбуждения следует размещать на сердечнике возможно ближе к якорю. С той же целью в крупных машинах вводят добавочный зазор между сердечником полюса и станиной. Однако последняя мера увеличивает количество меди обмотки добавочных полюсов, что ограничивает возможность ее применения.

Небольшие двухполюсные машины с $D \leqslant 13$ *см* выполняются обычно с одним добавочным полюсом. В этом случае э.д.с., индуктированная полем одного добавочного полюса, компенсирует реактивную э.д.с. обеих сторон коммутируемой секции и э.д.с. от поля реакции якоря в стороне секции, располагающейся вне добавочного полюса. Поэтому магнитная индукция $B_к$ в воздушном зазоре добавочного полюса в общем случае ускоренной коммутации составит:

$$B_к = A(\xi + \xi')\frac{l_\delta}{l_{рд}} + B_q\left(2\frac{l_\delta}{l_{рд}} - 1\right) + \frac{\Delta U_{щ\text{-}н} - \Delta U_{щ\text{-}с}}{w_с v_a l_{рд} \beta_щ} \cdot 10^6\ гс, \qquad (12\text{-}76)$$

где ξ по (12-47) рассчитывается со значением λ_z по (12-48а), а ξ' — со значением λ_z по (12-48б), B_q — по (12-56).

Намагничивающая сила обмотки возбуждения одного добавочного полюса с учетом замыкания линий магнитной индукции через главные полюсы равна:

$$F_д \approx 1{,}1\,(0{,}8\, B_к)\, 2k_{\delta д}\delta_д + 0{,}5\, A\tau, \qquad (12\text{-}77)$$

где $B_к$ определяется по (12-76).

В (12-77) приближенно принято, что зазоры под добавочным и главным полюсами одинаковы.

По данным практики, ориентировочно $F_д \approx (0,65 \div 0,75)\, A\tau$. Число витков добавочного полюса составит:

$$w_д = F_д / I_{ан}, \qquad (12\text{-}78)$$

где $F_д$ определяется по (12-77).

12-10. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА. ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Характеристика холостого хода дает зависимость э.д.с. якоря от тока возбуждения или полной н.с. возбуждения

$$E_a = f(I_в) \text{ или } E_a = f(F_0).$$

Характеристика строится по данным расчета магнитной цепи (см. гл. 6).

Дополнительно отметим, что если на поверхности якоря имеются канавки для укладки проволочных бандажей, крепящих якорную обмотку при открытых пазах, то коэффициент воздушного зазора по (6-19) следует умножить на коэффициент $k_{\delta 2}$, учитывающий влияние этих канавок:

$$k_\delta = k_{\delta 1}\, k_{\delta 2}\, k_{\delta 3}, \qquad (12\text{-}79)$$

где $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 3}$ — коэффициенты воздушного зазора, учитывающие зубчатость якоря и зубчатость поверхности полюсного наконечника главных полюсов при наличии компенсационной обмотки;

$k_{\delta 2}$ — коэффициент воздушного зазора для учета подбандажных канавок,

$$k_{\delta 2} \approx 1 + \frac{\delta'' - \delta'}{\delta''\,(l_\delta / l_{бж} - 1) + \delta'}; \qquad (12\text{-}80)$$

$\delta' = k_{\delta 1}\delta$ — основной расчетный зазор по (6-19);

$\delta'' = k''_\delta\, \delta_{бж}$ — расчетный зазор для зоны подбандажных канавок;

$\delta_{бж} = \delta + h_{бж}$ — зазор в зоне подбандажных канавок;

$h_{бж}$, $l_{бж}$ — глубина (высота) и суммарная ширина подбандажных канавок.

Для построения характеристики холостого хода задаются рядом значений э.д.с. E_a, равных 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,1 и 1,25 $E_{ан}$, где $E_{ан}$ определяется по (12-82).

Характеристика холостого хода позволяет проверить правильность соотношений магнитных напряжений на отдельных участках магнитной цепи. В нормальных машинах постоянного тока магнитное напряжение воздушного зазора F_δ при номинальной э.д.с. $E_{ан}$ обычно составляет 0,65—0,85 полной н.с. холостого хода F_0.

По данным расчета магнитной цепи строится переходная характеристика

$$B_\delta = f\left(\frac{F_\delta + F_z + F_a}{2}\right) = f(F_{\delta z a}), \qquad (12\text{-}81)$$

используемая для расчета размагничивающего действия поперечной н. с. якоря. В аргументе переходной характеристики $F_\delta + F_z + F_a = F_{\delta z a}$ часто пренебрегают последней составляющей F_a.

12-11. НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ СИЛЫ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ

Как указывалось (гл. 6), н.с. обмоток возбуждения, рассчитываемая при номинальной нагрузке, должна обеспечить компенсацию размагничивающего действия якоря $F_{р.я}$ и создать магнитный поток, необходимый для индуктирования измененной э. д. с. якоря $E_{ан}$:

$$E_{ан} = U_н \pm (I_{ан}\, \Sigma r_н + 2\Delta U_щ), \qquad (12\text{-}82)$$

где $U_н$ — номинальное напряжение;

$I_{ан}$ — ток якоря при номинальной нагрузке;

$\Sigma r_н$ — сумма сопротивлений всех обмоток цепи якоря; рекомендуется $\Sigma r_н$ определять для надежности расчета при нагреве обмоток до максимальной допускаемой температуры для

выбранного класса изоляции (см. табл. 11-1); согласно пп. 13 и 14 ГОСТ 10159-62 на методы испытаний машин постоянного тока допустимо принять $\Sigma r_н$ при нагреве обмоток до расчетной рабочей температуры 75° C для классов изоляции A, E и B или до 115° C для классов F и H;

$2\Delta U_ш$ — падение напряжения в переходных контактах щеток.

Знак плюс перед скобкой в (12-82) относится к генератору, знак минус к двигателю.

Значение н.с. обмоток возбуждения составит:

$$F_в = F_E + F_{р.я}; \qquad (12\text{-}83)$$

где F_E — н.с., которой соответствует при холостом ходе э.д.с. E_a (определяется по характеристике холостого хода).

Намагничивающая сила, учитывающая реакцию якоря, в общем случае состоит из размагничивающей составляющей F_{qd} поперечной реакции якоря и н.с. F_d продольной реакции якоря:

$$F_{р.я} = 2p(F_{qdн} + F_d). \qquad (12\text{-}84)$$

$F_{qdн}$ приближенно определяется по (6-90), $F_d = cA$, где $c \cong 0{,}4\ (\tau - b_\delta)$, *см*;

A — линейная нагрузка якоря, *а/см*.

Величина c, *см*, является мерой сдвига щеток с нейтрали. При наличии добавочных полюсов $c=0$.

В зависимости от способа возбуждения машины постоянного тока могут иметь обмотки: независимого возбуждения, параллельного возбуждения (шунтовые) и последовательного возбуждения (сериесные). Рассмотрим расчет н.с. различных обмоток возбуждения как для генераторного, так и для двигательного режимов работы машин.

А. Генераторы

Для генераторов независимого и параллельного возбуждения расчет н.с. при нагрузке производится по формулам (12-83) и (12-84) с учетом (12-82). Предварительное значение тока $I_{ан}$ определяется по (12-20).

Для генератора смешанного (компаундного) возбуждения имеем:

$$F_{в.н} = F_ш + F_{с.о}, \qquad (12\text{-}85)$$

где $F_ш$ — н.с. шунтовой обмотки (параллельного возбуждения);

$F_{с.о}$ — н.с. сериесной обмотки (последовательного возбуждения);

$$F_{с.о} = 2p\, w_{с.о} I_{с.о} \approx 2p w_{с.о} I_н; \qquad (12\text{-}86)$$

$w_{с.о}$ — число витков сериесной обмотки на один полюс;

$I_{с.о}$ — ток сериесной обмотки; в зависимости от места ее включения в цепь якоря $I_{с.о}$ может отличаться от $I_н$ (номинального тока генератора) на величину тока шунтовой обмотки.

Обычно в генераторе смешанного возбуждения требуется обеспечить номинальное напряжение как при холостом ходе, так и при номинальной нагрузке без регулирования тока возбуждения. Соответственно этому н.с. возбуждения шунтовой обмотки $F_ш$ определяется для $E_a = U_н$ по характеристике холостого хода, рассчитанной при $n_н$, если скорость вращения генератора с нагрузкой не изменяется. В случае применения для привода генератора асинхронного двигателя ($n_0 > n_н$) н.с. возбуждения $F_ш$ определяется по той же характеристике холостого хода, построенной для $n_н$, но для э.д.с. $E_a \approx U_н \frac{n_н}{n_0}$, где n_0 — скорость вращения при холостом ходе.

Расчетная величина н. с. сериесной обмотки возбуждения согласно (12-83) и (12-85) составит:

$$F_{с.о} = F_E + F_{р.я} - F_ш, \qquad (12\text{-}87)$$

где F_E — н. с., соответствующая э. д. с. E_a по (12-82), определяется по характеристике холостого хода;

$F_{р.я}$ — н.с. реакции якоря по (12-84).

При требовании широкого регулирования напряжения в генераторах с самовозбуждением, например в шунтовых, работающих в качестве возбудителей синхронных машин, необходимо, чтобы характеристика холостого хода имела изгиб примерно при $0{,}2\,U_н$. Для этого в главные

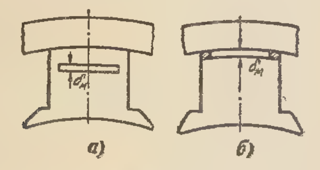


Рис. 12-15. Полюс с магнитным мостом насыщения.

а — с штампованной щелью; *б* — с прокладками между полюсом и станиной.

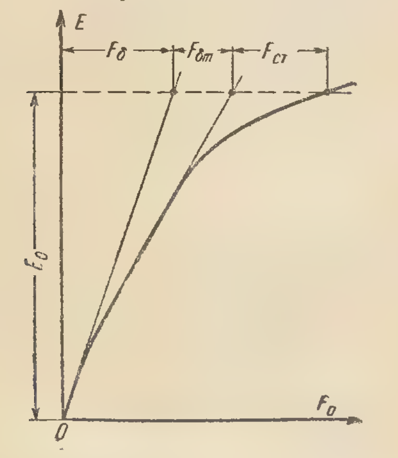


Рис. 12-16. Характеристика холостого хода с магнитным мостом насыщения.

полюсы вводят магнитный мост насыщения, образуемый выштамповкой в полюсе узкой щели (рис. 12-15, *а*) или путем наварки небольших полосок стали, образующих магнитный мост (рис. 12-15, *б*). Таким образом, высота щели равна высоте моста. Магнитный мост насыщается при небольшом потоке полюса, что равноценно введению в магнитную цепь добавочного воздушного зазора. В результате характеристика холостого хода генератора получает дополнительный изгиб (рис. 12-16).

Дополнительное магнитное напряжение в мосте насыщения учитывается при расчете н.с. возбуждения аналогично расчету магнитного напряжения в зубцовом слое (§ 6-2). Исходя из уравнения (6-28) и принимая во внимание линейную зависимость кривой намагничивания стали вида $B=B_0+0{,}4\pi H$, получаем напряженность поля в мосте насыщения:

$$H_м=\frac{B_м-B_0}{0{,}4\,\pi\,(1+k_м)},\qquad(12\text{-}88)$$

где $B_м$ — магнитная индукция в мосте насыщения, *гс*;

$$k_м=\frac{S_m-S_м}{S_м};$$

S_m — поперечное сечение сердечника полюса;

$S_м$ — поперечное сечение моста насыщения.

При значении $H_м$ (12-88) добавочное магнитное напряжение в магнитном мосте насыщения составит:

$$F_м=2pH_м\delta_м,\qquad(12\text{-}89)$$

где $\delta_м$ — высота магнитного моста насыщения, *см*.

При стали Э11 принимают $B_0=21\,000$ *гс*, а высоту моста насыщения $\delta_м=0{,}15\div0{,}3$ *см*.

Б. Двигатели

Расчет н.с. возбуждения при нагрузке $F_{в.н}$ для двигателей независимого и параллельного (шунтового) возбуждения производится по формуле (12-83) аналогично расчету для генераторов.

При этом в формуле э.д.с. якоря (12-82) учитывается изменение знака для падения напряжения и знака коэффициента $k_в$, определяющего предварительное долевое значение тока возбуждения (12-20).

По найденному значению $F_{в.н}$ оценивается устойчивость работы двигателя. Для устойчивой работы необходимо, чтобы $n_0\geqslant(1{,}05\div1{,}20)\,n_н$, где n_0 — скорость вращения двигателя при холостом ходе.

Скорость n_0 определяется по э.д.с. якоря при холостом ходе:

$$E_0\approx U_н-\Big(I_{a0}\Sigma r_н+2\Delta U_щ\frac{I_{a0}}{I_{aн}}\Big).\qquad(12\text{-}90)$$

Приблизительное значение тока якоря при холостом ходе составляет:

$$I_{a0} \approx \frac{P_{мех} + P_c}{U_н}, a, \quad (12\text{-}91)$$

где $P_{мех}$ и P_c — механические потери и потери в стали якоря, *вт* (см. гл. 8).

При холостом ходе двигателя можно принять $E_0 \approx U_н$. Для определения n_0 целесообразно обратиться к характеристике холостого хода, построенной для значений э.д.с., отнесенных к 1 *об/мин*:

$$E/n_н = e_n = f(F_0). \quad (12\text{-}92)$$

Очевидно, изменив соответственным образом масштаб для ординат обычной характеристики холостого хода, можно получить ту же характеристику по (12-92).

При холостом ходе двигателя можно пренебречь реакцией якоря и считать $F_0 \approx F_{в.н}$. Тогда, определив по указанной характеристике e_n для F_0, получим:

$$n_0 = E_0/e_n \approx U_н/e_n, \ об/мин. \quad (12\text{-}93)$$

Если значение n_0 не будет удовлетворять условию устойчивой работы, следует увеличить воздушный зазор машины или применить стабилизирующую последовательную обмотку возбуждения.

В двигателях с регулированием скорости вращения путем изменения магнитного потока н.с. возбуждения при нагрузке определяется и для низшей $n_{н(н)}$ и для высшей $n_{н(в)}$ скоростей вращения.

Расчет $F_{в.н}$ для низшей, основной скорости вращения $n_{н(н)}$, по которой находят главные размеры машины, выполняется, так же как и для нерегулируемых двигателей, по формулам (12-82) и (12-83). При высшей номинальной скорости $n_{н(в)}$ н.с. F_E находится по характеристике относительных э.д.с. $e_n = f(F_0)$ для значения $e_n = E_{ан}/n_{н(в)}$, а н.с. $F_{р.я}$ рассчитывается по переходной характеристике (12-81) при

$$B_\delta = B_{\delta н} \frac{n_{н(н)}}{n_{н(в)}}.$$

Для расчета скорости вращения холостого хода $n_{0(в)}$ (верхнего предела при ослабленном поле) ток холостого хода (12-91) определяется при повышенных механических потерях, равных $P_{мех}\left[\frac{n_{н(в)}}{n_{н(н)}}\right]^3$, если двигатель имеет собственный вентилятор на валу, когда подавляющими механическими потерями будут вентиляционные, и равных при независимой вентиляции двигателя $P_{мех}\frac{n_{н(в)}}{n_{н(н)}}$; потери P_c принимаются приблизительно постоянными, так как с увеличением скорости вращения и частоты перемагничивания уменьшается магнитный поток.

При повышенной скорости вращения сильно искажается кривая поля. Поэтому следует проверить $U_{к.макс}$ по (12-17), определив по переходной характеристике $k_{иск}$ [см. (12-18)]. Устойчивость работы двигателя проверяется и при высшей и при низшей скоростях вращения. Обычно получается соотношение $n_{0(в)} - n_{н(в)} > n_{0(н)} - n_{н(н)}$.

В двигателях с $P_н \leqslant 85$ *квт* при регулировании скорости вращения в диапазоне 2,5 : 1 и более путем изменения магнитного потока применяют последовательную стабилизирующую обмотку, в двигателях с $P_н = 100 \div 150$ *квт* переходят, как отмечалось в § 12-7, к применению компенсационной обмотки.

Двигатели смешанного возбуждения (компаундные) в общепромышленном исполнении имеют последовательную обмотку, используемую главным образом в качестве стабилизирующей, имеющей относительно небольшое число витков. В двигателях смешанного возбуждения, предназначенных для регулируемых приводов с ударной нагрузкой, последовательная обмотка выполняется более мощной. Однако метод расчета н.с. последовательной обмотки двигателя смешанного возбуждения является единым, не зависящим от ее назначения.

Стабилизирующая последовательная обмотка при достаточном числе витков обеспечивает устойчивую работу регулируемых двигателей при уменьшенном воздушном зазоре δ, таком, например, какой выбирается для нерегулируемых двигателей. Эта обмотка дает неко-

торое увеличение начального пускового момента. Наряду с этим усложняются изготовление и схема реверсирования двигателя. В регулируемых двигателях небольшой мощности при $n_{н(в)} : n_{н(н)} > 2 \div 2{,}5$ заметно возрастает перепад скорости вращения в верхнем диапазоне $n_{0(в)} - n_{н(в)}$. Некоторые зарубежные фирмы применяют стабилизирующую обмотку в двигателях, начиная с мощности 10—15 *квт*. По-видимому, в малых двигателях применение стабилизирующей обмотки не всегда необходимо ввиду относительно большого падения напряжения в цепи якоря.

Расчет н.с. при нагрузке параллельной (шунтовой) и последовательной (сериесной) обмоток возбуждения можно выполнить исходя из соотношений (12-83) и (12-85), которые дают:

$$F_{в.н} = F_{ш(н)} + F_{с.о} = F_{E(н)} + F_{р.я(н)}. \qquad (12\text{-}94)$$

Здесь $F_{ш(н)}$, $F_{с.о}$ — н. с. шунтовой и соответственно сериесной обмоток возбуждения. Намагничивающая сила $F_{E(н)}$ находится по характеристике холостого хода, построенной для основной номинальной скорости вращения $n_{н(н)}$ и значения э.д.с. $E_{a(н)}$ по (12-82); н.с. реакции якоря $F_{р.я(н)}$ определяется по (12-84) с использованием переходной характеристики (12-81) для $B_{\delta н}$ и $I_{ан}$; н.с. шунтовой обмотки $F_{ш(н)}$, обеспечивающей заданную скорость холостого хода $n_{0(н)}$ при нижнем, основном пределе регулирования скорости, находится по характеристике (12-92) при значении относительной э.д.с. $e_n = E_0/n_{0(н)}$, где E_0 рассчитывается по (12-90). Значение $n_{0(н)}$ для регулируемых двигателей путем изменения магнитного потока принимается:

$$n_{0(н)} \geqslant (1{,}05 \div 1{,}10)\, n_{н(н)}.$$

Определив перечисленные выше н.с., находим по (12-87):

$$F_{с.о} = F_{E(н)} + F_{р.я(н)} - F_{ш(н)}.$$

По значению $F_{с.о}$ число витков сериесной обмотки составит:

$$w_{с.о} = \frac{F_{с.о}}{2pI_{ан}}. \qquad (12\text{-}95)$$

Значение $w_{с.о}$ выбирается возможно более близким к полученному по (12-95). В случае необходимости можно выполнить обмотку с двумя параллельными ветвями ($a_{с.о} = 2$). Тогда $w_{с.о}$ будет в 2 раза больше, чем по (12-95).

После того как установлено число витков $w_{с.о}$, а следовательно, н.с. $F_{с.о}$, для верхнего заданного предела скорости $n_{н(в)}$ определяется значение н.с. $F_{ш(в)}$ из соотношения (12-87):

$$F_{ш(в)} = F_{E(в)} + F_{р.я(в)} - F_{с.о}. \qquad (12\text{-}96)$$

Значение $F_{ш(в)}$ позволяет найти $n_{0(в)}$ по e_n при $F_0 = F_{ш(в)}$ и э.д.с. E_0 по способу, указанному ранее для шунтового регулируемого двигателя. Значение $n_{0(в)} - n_{н(в)}$ может составить 2—3 от разности $n_{0(н)} - n_{н(н)}$, если не увеличить δ и не снизить предварительно линейную нагрузку якоря A.

Двигатели последовательного возбуждения (сериесные) при мощности $P_н > 1$ *квт* выпускаются как двигатели специального назначения для электрифицированного транспорта, крановых установок и т. п. При $P_н < 1$ *квт* эти двигатели нашли широкое применение в основном как универсальные двигатели с питанием от сетей постоянного и переменного тока в бытовых электрифицированных приборах, в автоматических устройствах и т. п.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения при нагрузке для них определяется так же, как для двигателей параллельного или независимого возбуждения.

12-12. РАЗМЕРЫ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Размеры обмоток определяются значением н.с. возбуждения при нагрузке, допустимой плотностью тока и условиями охлаждения.

а) **Размеры обмоток параллельного и независимого возбуждения.** Максимальная расчетная н.с. обмотки возбуждения составит $F_{макс} = k_{зап}F_{в.н} = 2pw_в I_в$, где $k_{зап}$ — коэффициент запаса; $F_{в.н}$ — н.с. при нагрузке (§ 12-11); $w_в$ — число витков возбуждения на один полюс; $I_в$ —

Таблица 12-12

Допустимые плотности тока в обмотках параллельного возбуждения (шунтовых)

Конструктивная особенность машины	Плотность тока $\Delta_ш$, $а/мм^2$		
	Класс изоляции		
	A	B	F, H
Машины с аксиальной самовентиляцией; $D \leq 20$ *см*, $n=600 \div 3\,000$ *об/мин*	3—4	3,5—4,5	
То же; $D=20 \div 50$ *см*, катушки разделяются на секции вентиляционными каналами	2,5—3	2,5—3,5	3—4
Машины с принудительной вентиляцией; $D \geq 30$ *см*, $n \geq 250$ *об/мин*; катушки сплошные	1,6—2,5	2—3	2,5—3,5

Примечания: 1. Меньшие плотности тока при низших скоростях вращения. 2. При $n<250$ *об/мин* и самовентиляции $\Delta_ш=1,4 \div 1,8$ $а/мм^2$. 3. При принудительной вентиляции принимают большие значения $\Delta_ш$. 4. $\Delta_ш$ при классах F и H ограничивают потерями на возбуждение, а не нагревом. 5. При алюминиевом проводе $\Delta_ш$ снижается на 40%.

ток возбуждения. При напряжении возбуждения $U_в$ и сопротивлении обмотки возбуждения, нагретой до максимально допускаемой для выбранног класса изоляции температуры $\vartheta_{макс}$ (табл. 11-1), определим $I_в=U_в/r_{в.н}$.

Величина $r_{в н}$ для медной обмотки равна:

$$r_{в.н}=k_\vartheta r_{в20}=k_\vartheta \frac{2pw_в l_{в.ср}}{5\,600\, s_в},\ ом, \quad (12\text{-}97)$$

где k_ϑ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве;
$l_{в.ср}$ — средняя длина витка обмотки, *см*;
$s_в$ — поперечное сечение проводника обмотки, $мм^2$.

Средняя длина витка катушки

$$l_{в.ср} = 2\,[l_m + b_m + 4\,\Delta_{из}] + \pi b_к,\ см, \quad (12\text{-}98)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции сердечника полюса; $b_к$ — ширина катушки; предварительно $\Delta_{из}\approx 0,2$ *см*; при $D \leq 30$ *см* $b_к=2,5$ *см*, при $D>30$ *см* $b_к \leq 5$ *см*. Сопротивление обмотки $r_{в20}$ относится к 20° С.

Совместное решение приведенных уравнений дает:

$$s_в = \frac{k_{зап}\, k_\vartheta\, F_{в.н}\, l_{в.ср}}{5\,600\, U_в},\ мм^2. \quad (12\text{-}99)$$

Можно принять для генераторов $k_{зап}=1,15 \div 1,20$, для двигателей $k_{зап}=1,05 \div 1,1$; k_ϑ в зависимости от класса принятой изоляции берут по табл. 11-8.

При параллельном возбуждении $U_в=U_н$. Значение $s_в$ уточняется в соответствии с ГОСТ (приложение IV); при $s_в \leq 2 \div 2,5$ $мм^2$ выбирают круглый провод, при бóльших сечениях — прямоугольный.

Максимальный ток обмоток параллельного (шунтового) возбуждения при выбранной плотности тока $\Delta_ш$ (табл. 12-12)

$$I_{ш.макс}=\Delta_ш\, s_ш,\ а. \quad (12\text{-}100)$$

Тогда число витков на полюс составит:

$$w_ш = \frac{F_{макс}}{2pI_{ш.макс}} = \frac{k_{зап}\, F_{ш.н}}{2pI_{ш.макс}}. \quad (12\text{-}101)$$

Укладка обмотки производится согласно указаниям гл. 5.

Уточняются окончательные размеры и вес обмотки, равный при медных проводниках

$$G_ш=8,9 \cdot 2pw_ш l_{ш.ср} s_ш \cdot 10^{-5}\ кг, \quad (12\text{-}102)$$

где $l_{ш.ср}$ — в сантиметрах;
$s_ш$ — в квадратных миллиметрах.

б) **Размер последовательных (сериесных) обмоток.** Принимая ток обмотки, равным току якоря, получаем при числе параллельных ветвей $a_{с.о}$ число витков на полюс

$$w_{с.о} = \frac{F_{с.о}\, a_{с.о}}{2pI_{ан}}, \quad (12\text{-}103)$$

где $F_{с.о}$ — н. с. последовательной

обмотки при номинальном токе нагрузки.

При $I_{ан} \leqslant 200$ *а* принимают $a_{с.о} = 1$; при больших токах увеличением числа $a_{с.о}$ можно приблизить $w_{с.о}$ по (12-103) к целому числу. Обычно $a_{с.о}$ берут равным 1 или 2.

Поперечное сечение проводника обмотки

$$s_{с.о} = \frac{I_{ан}}{a_с \Delta_{с.о}}, \text{ мм}^2,$$

где $\Delta_{с.о}$ — допустимая плотность тока; принимают $\Delta_{с.о} \approx 1{,}2\Delta_{ш}$. Сечение проводника выбирают по ГОСТ (приложение IV). Укладка обмотки производится согласно указаниям гл. 5. Сопротивление обмотки при медных проводниках

$$r_{с.о} = k_\vartheta \frac{2p w_{с.о} l_{с.ср}}{5\,600\, a_{с.о}^2\, s_{с.о}}, \text{ ом}, \quad (12\text{-}104)$$

где $l_{с.ср}$ — средняя длина витка по (12-98); k_ϑ — из табл. 11-8. Обычно $l_{с.ср} \approx l_{ш.ср}$. Вес медной обмотки подсчитывается по (12-102).

12-13. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Компенсационная обмотка предотвращает искажение поля в воздушном зазоре при нагрузке и тем самым препятствует возрастанию напряжения между соседними коллекторными пластинами $U_{к.макс}$. Поэтому основным критерием применения компенсационной обмотки является величина $U_{к.макс}$ (12-17), допустимые значения которой приведены в табл. 12-7. Одновременно компенсационная обмотка компенсирует размагничивающее действие якоря, улучшая этим рабочие характеристики машины. Компенсационная обмотка нашла применение в машинах с высокими окружными скоростями якоря, большими кратковременными перегрузками, высокими пределами регулирования скорости вращения путем изменения магнитного потока. Существуют регулируемые электродвигатели мощностью 55 *квт*, 300—1 500 *об/мин*, снабженные компенсационной обмоткой, допускающие 2,5-кратную перегрузку по току. Величина вращающего момента 180 *кГ·м*, развиваемого ими, может служить в некоторой степени критерием, превышение которого вызовет необходимость применения компенсационной обмотки. В машинах с $P_н \geqslant 800 \div 1\,000$ *квт*, как правило, применяется компенсационная обмотка.

Компенсационная обмотка располагается в пазах, обычно прямоугольного сечения, выштампованных в полюсных наконечниках. Стремятся выбрать число витков компенсационной обмотки, т. е. число стержней в пазу и ток в них, таким образом, чтобы линейная нагрузка тока компенсационной обмотки равнялась линейной нагрузке якоря. Число пазов $Z_{к.о}$ на полюсной дуге выбирают во избежание магнитного шума таким, чтобы зубцовые деления якорной обмотки t_1 и компенсационной обмотки $t_{к.о}$ не равнялись друг другу; принимают $0{,}9\,t_1 > t_{к.о} > 1{,}1 t_1$. Для получения более точной компенсации вводят в обмотку параллельные ветви $a_{к.о}$; обычно принимают $a_{к.о}$ равным 1 или 2. Вследствие последовательного соединения обмоток добавочных полюсов и компенсационной число их параллельных ветвей берут одинаковым (рис. 5-12). Плотность тока проводников компенсационной обмотки принимают в пределах 4,7 $а/мм^2 \geqslant \Delta_{к.о} \geqslant 3{,}5$ $а/мм^2$; бóльшие значения относятся к более мощным машинам.

Компенсационную обмотку выполняют обычно стержневой. При токе $I_{ан} < 1\,000$ *а* и $2p = 4$ применяют секционную или катушечную однослойную обмотку по типу однослойных обмоток статора машин переменного тока. Намагничивающая сила $F_{к.о}$ компенсационной обмотки на протяжении полюсной дуги составит $F_{к.о} = N_{к.о} I_{ан} / a_{к.о}$. Здесь $N_{к.о}$ — число стержней (проводников) на полюсной дуге. Оставшаяся часть н. с. якоря, равная $A\tau - F_{к.о}$, должна быть компенсирована катушками обмотки двух добавочных полюсов.

12-14. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Эксплуатационные свойства рассчитанных машин оцениваются по их надежности в работе, рабочим

характеристикам и энергетическим показателям.

Из рабочих характеристик генераторов определяется изменение напряжения генератора ΔU при изменении нагрузки; для двигателей строится механическая характеристика $n=f(M)$ при $U=\text{const}$ и $I_в=\text{const}$, где M — вращающий момент двигателя. Энергетическим показателем является к.п.д. машины. Дополнительно определяются удельные веса активных материалов (меди и электротехнической стали), конструкционных материалов машины, отнесенные к единице мощности (обычно на 1 *квт* номинальной мощности), и полный вес машины.

А. Генераторы

Для генераторов определяется процентное повышение напряжения $\Delta U\%$ при сбросе номинальной нагрузки. Так как первичные приводные двигатели генераторов при изменении нагрузки изменяют скорость вращения, при определении $\Delta U\%$ желательно учесть непостоянство скорости вращения.

Потери и к.п.д. генераторов, как правило, определяются для номинального режима работы.

а) **Генератор независимого возбуждения** (при наличии или отсутствии последовательных обмоток возбуждения). При сбросе номинальной нагрузки и повышенной скорости вращения до n_0 максимальное напряжение составит:

$$U_{0макс}=E_0\frac{n_0}{n_н}, \qquad (12\text{-}105)$$

где E_0 — напряжение генератора, равное э.д.с. якоря при холостом ходе, найденное по характеристике холостого хода при номинальном токе возбуждения

$$I_{в.н}=I_{ш.н}=\frac{F_{ш.н}}{2p\,w_ш}; \qquad (12\text{-}106)$$

$F_{в.н}=F_{ш.н}$ — н.с. возбуждения, рассчитанная при номинальной нагрузке (§ 12-11).

Процентное изменение напряжения

$$\Delta U\% = \frac{U_{0\,макс}-U_н}{U_н}\cdot 100\%. \qquad (12\text{-}107)$$

б) **Генератор параллельного или смешанного возбуждения.** Определяется сопротивление шунтовой цепи возбуждения при номинальном режиме нагрузки

$$\sum r_ш=\frac{U_н}{I_{ш.н}},\ ом, \qquad (12\text{-}108)$$

где $I_{ш.н}$ определяется по (12-106).

По значению $\Sigma r_ш$ и отношению скоростей вращения $n_н/n_0$ определяется сопротивление шунтовой цепи возбуждения, приведенное к скорости холостого хода:

$$\Sigma r'_ш=\Sigma r_ш\, n_н/n_0. \qquad (12\text{-}109)$$

На пересечении характеристики холостого хода $E_0=f(I_ш)$ и «прямой сопротивления», определяемой уравнением $I_ш\,\Sigma r'_ш=U$ и направленной под углом α' к оси абсцисс, где $\operatorname{tg}\alpha'=\Sigma r'_ш$, находим точку условной э.д.с. холостого хода E'_0 (рис. 12-17),

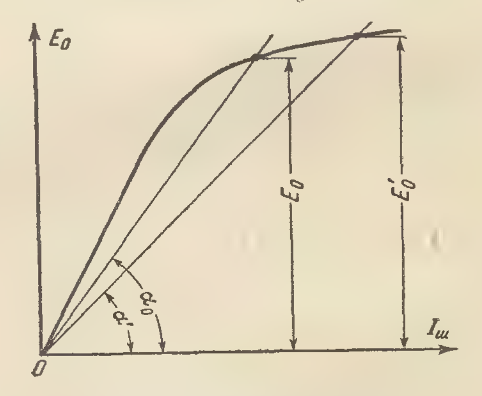


Рис. 12-17. К определению напряжения генератора при сбросе нагрузки.

приведенной к скорости вращения $n_н$. Максимальное напряжение при сбросе нагрузки и скорости холостого хода n_0 составит:

$$U_{0макс}=E'_0\,n_0/n_н. \qquad (12\text{-}105а)$$

Процентное изменение напряжения определяется по (12-107).

Потери и к.п.д. генераторов рассчитываются по указаниям гл. 8 (см. также примеры расчета).

Б. Двигатели

Расчет механической характеристики производится с использованием указаний § 12-11, расчет потерь и к.п.д. — с использованием указаний гл. 8.

а) **Двигатели параллельного (шунтового), смешанного и независимого возбуждения (при наличии или отсутствии последовательной обмотки).** Механическая характеристика строится при постоянных значениях $U_н$ и $I_ш$. Для двигателей с регулированием скорости вращения путем изменения магнитного потока рассчитываются две механические характеристики: 1) при низшей скорости вращения $n_{н(н)}$ и 2) при высшей скорости вращения $n_{н(в)}$.

Предварительно устанавливается ток шунтовой (параллельной) обмотки. Для этого при номинальном токе якоря $I_{ан}$ вычисляется номинальная э.д.с. $E_{ан}$ по (12-82) и по характеристике холостого хода, построенной при номинальной скорости вращения $n_{н(н)}$, определяется н.с. $F_{E(н)}$, соответствующая э.д.с. $E_{ан}$. Затем по переходной характеристике при $B_{\delta н}$ определяется размагничивающая н.с. реакции якоря $F_{р.я(н)}$ по (12-84) и н.с. $F_{с.о}$ — последовательной (сериесной) обмотки возбуждения по (12-86). Тогда значение н.с. шунтовой обмотки составит:

$$F_{ш(н)} = F_{E(н)} + F_{р.я(н)} - F_{с.о}; \quad (12\text{-}110)$$

ток шунтовой обмотки возбуждения будет:

$$I_{ш(н)} = \frac{F_{ш(н)}}{2pw_ш}, \; a. \quad (12\text{-}111а)$$

Для регулируемых двигателей н.с. $F_{ш(в)}$ верхнего предела скорости вращения $n_{н(в)}$ определяется по характеристике холостого хода, построенной в относительных э.д.с. (12-92) для значения $e_n = E_a/n_{н(в)}$. Намагничивающая сила реакции якоря $F_{р.я(в)}$ находится по (12-84) при $B_\delta = B_{\delta н}\, n_{н(н)}/n_{н(в)}$. Тогда значение $F_{ш(в)}$ рассчитывается по (12-96), ток шунтовой обмотки для верхнего предела скорости вращения $n_{н(в)}$ составит:

$$I_{ш(в)} = \frac{F_{ш(в)}}{2pw_ш}, \; a. \quad (12\text{-}111б)$$

Для дальнейшего расчета задаются значениями тока якоря I_a, равными 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 и 1,25 $I_{ан}$, включая значение тока холостого хода I_{a0} по (12-91), и рассчитывают э.д.с. якоря:

$$F_a = U_н - (I_a \Sigma r_н + I_a/I_{ан}\; 2\Delta U_ш). \quad (12\text{-}112)$$

Значения F_E находятся по формуле

$$F_E = F_ш + 2pw_{с.о}\, I/_a - I_a/I_{ан}\, F_{р.я}, \quad (12\text{-}113)$$

где $F_ш$ = const выбирается по номинальной скорости $n_н$ предела регулирования, т. е. $F_{ш(н)}$ и $F_{ш(в)}$;

$F_{р.я}$ выбирается также из двух значений $F_{р.я(н)}$ и $F_{р.я(в)}$.

Затем по характеристике $e_n = f(F_0)$ определяется e_n для значений F_E, найденных по (12-113).

Тогда скорость вращения при токе I_a составит:

$$n = E_a/e_n, \; об/мин. \quad (12\text{-}93а)$$

Полезная мощность на валу

$$P_2 = E_a I_a - (P_с + P_{мех}) - (I_a/I_{ан})^2 P_{доб}, \; вт, \quad (12\text{-}114)$$

где $P_с$ — потери в стали по (8-36), принимаются приблизительно постоянными;

$P_{мех}$ — по рис. 8-3; при аксиальной вентиляции и с собственным вентилятором на валу потери $P_{мех}$ принимаются пропорциональными n^3;

$P_{доб}$ — добавочные потери по (8-7); изменяются пропорционально квадрату тока якоря.

По мощности P_2 и скорости вращения n определяется вращающий момент на валу:

$$M = 0{,}973\, P_2/n, \; кГ \cdot м. \quad 12\text{-}115)$$

Потребляемая мощность P_1 равна:

$$P_1 = U_н I, \; вт, \quad (12\text{-}116)$$

где

$$I = I_a + I_ш, \; a. \quad (12\text{-}117)$$

$I_ш$ = const выбирается в зависимости от предела номинальной скорости вращения равным $I_{ш(н)}$ и $I_{ш(в)}$.

Таблица 12-13

Результаты расчета характеристик двигателя

№ расчетной точки	$I_ш$, *а*	I_a, *а*	E_a, *в*	F_E, *а*	e_n, *в·мин*	*n*, *об/мин*	P_2, *вт*	*M*, *кГ·м*	*I*, *а*	P_1, *вт*	η, %
1											
2											
—											
—											
5											

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta=P_2/P_1\cdot 100\%. \quad (12\text{-}118)$$

Результаты расчета сводят в табл. 12-13, а на графике, аналогичном рис. 12-30, строят кривые

$$\left.\begin{matrix} n,\ M,\ I,\ P_1,\ \eta=f(P_2) \\ \text{или} \\ n,\ I,\ P_2,\ P_1,\ \eta=f(M). \end{matrix}\right\} \quad (12\text{-}119)$$

б) Двигатели последовательного (сериесного) возбуждения. Механическая характеристика строится при $U_н$ и постоянном коэффициенте шунтировки обмотки возбуждения

$$k_ш=I_{с.о}/I_a=I_{с.о}/I\leq 1,$$

где $I_{с.о}$ — ток последовательной (сериесной) обмотки возбуждения;

$I_a=I$ — ток якоря, равный полному току двигателя.

Минимальное значение $k_ш$ определяется максимальной скоростью вращения при шунтировке поля. Для расчета механической характеристики можно принять отсутствие шунтировки ($k_ш=1$).

При расчете задаются значениями тока якоря I_a, равными 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 и 1,25$I_н$. По (12-112) рассчитывают э.д.с. якоря E_a; при этом сумма сопротивлений обмоток якоря, приведенных к рабочей температуре, составит:

$$\Sigma r_н=r_a+r_{с.о}k_ш+r_д=r_a+r_{с.о}+r_д.$$

Далее по (12-86) определяют н.с. обмотки возбуждения $F_{с.о}$, а по (12-84) н.с. реакции якоря $F_{р.я}$. При определении $F_{р.я}$ значение F_{qd} находят по переходной характеристике $B_\delta=f(F_{\delta za})$ при значениях $F_{\delta za}\approx\approx\frac{I_a}{I_н}F_{\delta zн}$, где $F_{\delta zн}$ — н.с., соответствующая номинальному режиму работы двигателя.

Затем вычисляют н.с. F_E аналогично (12-113)

$$F_E=F_{с.о}-F_{р.я} \quad (12\text{-}113а)$$

и по характеристике холостого хода $e_n=E/n=f(F_0)$ находят e_n при значении $F_0=F_E$. Тогда по (12-92) скорость вращения *n* составит:

$$n=E_a/e_n.$$

Значение P_2 находят по (12-114); при этом механические потери принимают для самовентилируемых двигателей изменяющимися пропорционально n^3. По (12-115) определяют вращающий момент на валу двигателя, по (12-116) — потребляемую мощность P_1 и по (12-118) — значение к.п.д.

Расчеты сводят в таблицу и строят кривые *n*, *I*, P_2, P_1, $\eta=f(M)$.

12-15. МАШИНЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Мощность неспециализированных машин постоянного тока ограничивается, как отмечалось, главным образом допустимым нагревом их обмоток. С возрастанием мощности машины и ее скорости вращения становится все более затруднительным создание удовлетворительной коммутации, т. е. создание удовлетворительных условий для работы щеток и коллектора, при которых не возникало бы ни искрения под щетками, ни кругового огня на коллекторе. Эти условия зависят не от нагрева обмоток, а от других величин, для которых практика установила некоторые предельные значения [Л. 90, 91]. Основными из этих величин являются линейная нагрузка якоря *A*, окружная скорость якоря v_a, реактивная э.д.с. в коммутируе-

мой секции e_R, максимальная индукция в воздушном зазоре B_δ, а также максимальное напряжение $U_{к.макс}$ между соседними коллекторными пластинами.

Машины постоянного тока, для которых взяты предельные допустимые значения указанных величин, называются машинами предельной мощности. К ним можно отнести: крупные двигатели для привода реверсивных и нереверсивных прокатных станов и генераторы для питания этих двигателей, генераторы для теплоэлектровозов, генераторы и двигатели для привода судов (например, для атомохода «Ленин»), возбудители для турбогенераторов большой мощности.

Предельное значение линейной нагрузки $A = 500 \div 600$ *а/см*. От A зависят условия коммутации и температурный перепад в изоляции обмотки якоря. Значение A только в отдельных случаях может достигать 600 *а/см* в машинах с относительно небольшой длиной якоря и пониженной окружной скоростью; обычно $A \leqslant 550$ *а/см*.

Окружная скорость якоря v_a, *м/сек*, крупных машин при $D > 1,5 \div 2$ *м* не должна превышать примерно 70 *м/сек*; при $v_a > 70$ *м/сек* возникают большие трудности в выполнении достаточно прочных и надежных креплений частей якоря и коллектора. При $D < 1$ *м* скорость v_a может быть повышена до 80—90 *м/сек*.

Что касается реактивной э.д.с. e_R, то для нее не могут быть установлены определенные предельные значения, так как условия коммутации зависят от причин, не всегда поддающихся количественной оценке. Для крупных машин со спокойной нагрузкой можно допустить $e_R = 14 \div 16$ *в*. Если же машины работают с ударными нагрузками, например прокатные двигатели и питающие их генераторы, у которых максимальный ток якоря $I_{макс}$ временами может достигать $I_{макс} = k_{пер} I_н = (2 \div 2,8) I_н$, где $k_{пер}$ — коэффициент перегрузки по току, то e_R не следует брать больше 6—9 *в*. Несколько большие значения e_R допустимы при шихтованном ярме статора.

Предельное значение индукции B_δ в воздушном зазоре ограничивается допустимой магнитной индукцией в зубцах.

В крупных машинах почти всегда применяется компенсационная обмотка (§ 12-13), что позволяет выбирать предельные значения B_δ, если максимальное напряжение $U_{к.макс}$ между соседними коллекторными пластинами не превышает допустимой величины. При наличии компенсационной обмотки допустимое напряжение между соседними коллекторными пластинами можно оценивать средним его значением $U_{к.ср}$, равным:

$$U_{к.ср} = \alpha_\delta U_{к.макс} = \frac{2pU_н}{K}.$$

По данным практики, предельными значениями $U_{к.ср}$ следует считать при одноходовой обмотке якоря 18—20 *в*, а при двухходовой 16 *в*; в обоих случаях имеются в виду петлевые или лягушечьи обмотки. В крупных машинах при одноходовой обмотке обычно принимается $U_{к.ср} = 18$ *в*; при двухходовой обмотке $U_{к.ср}$ приходится несколько снижать (примерно до 16 *в*), так как распределение напряжения между соседними пластинами двух ходов обмотки может отличаться от равномерного.

Рассмотрим теперь, как зависит мощность машины от перечисленных величин; при этом будем считать $P_{2н} \approx P_{1н} = P$, так как в крупных машинах к.п.д. довольно высок (0,94—0,96).

Мощность машины $P = U_н I_н \cdot 10^{-3}$ *квт*. Подставляя в это уравнение $U_н = K U_{к.ср}/2p$ и учитывая, что $K = 2a\pi DA/I_н \cdot 2w_c$, находим:

$$P = 0,157 D U_{к.ср} A \frac{a}{pw_c}, \text{ квт} \quad (12\text{-}120)$$

или

$$(P/D)_{U_{к.ср}} = 0,157 U_{к.ср} \times A \frac{a}{pw_c}, \text{ квт/м}, \quad (12\text{-}121)$$

где D — диаметр якоря, *м*; w_c — число витков в секции.

Принимаем предельные значения: $A=550$ *а/см*, при $a=p$ $U_{к.ср}=18$ *в*, а при $a=2p$ $U_{к.ср}=16$ *в* (для крупных машин всегда $w_c=1$), получаем при $a=p$

$$(P/D)_{U_{к.ср}} = 1\,550 \text{ квт/м}, \quad (12\text{-}122а)$$

а при $a=2p$

$$(P/D)_{U_{к.ср}} = 2\,770 \text{ квт/м}. \quad (12\text{-}122б)$$

Следовательно, если исходить из предельно допустимого значения $U_{к.ср}$, то при $a=p$ получается максимальная мощность $P_{макс}=1\,550D$, что дает при предельном диаметре по условиям железнодорожного транспорта $D=4\div4{,}2$ *м*, $P_{макс}=6\,200\div6\,500$ *квт*. При $a=2p$ можно получить $P_{макс}=11\,000\div11\,600$ *квт*.

Если подставить в (12-120) вместо D окружную скорость якоря v_a и скорость вращения n, то, учитывая равенство $D=\frac{60}{\pi}\frac{v_a}{n}$, получаем

$$P = 3\frac{v_a}{n}U_{к.ср}A\frac{a}{pw_c} \quad (12\text{-}123)$$

или

$$(Pn)_{U_{к.ср}} = 3v_aU_{к.ср}\times A\frac{a}{pw_c}, \text{ квт·об/мин}. \quad (12\text{-}124)$$

Подставив в (12-124) указанные ранее предельные значения, найдем:

при $a=p$

$$(Pn)_{U_{к.ср}} \approx 2{,}08\cdot10^6, \text{ квт·об/мин}; \quad (12\text{-}125а)$$

при $a=2p$

$$(Pn)_{U_{к.ср}} = 3{,}7\cdot10^6, \text{ квт·об/мин}. \quad (12\text{-}125б)$$

По формулам (12-121)—(12-125б) определяется предельная (максимальная) мощность, если исходить из допустимого значения $U_{к.ср}$ и не учитывать реактивной э.д.с. e_R. Однако дальнейший анализ показывает, что ограничение мощности для машин при двухходовой обмотке, работающих с указанной выше перегрузкой $k_{пер}=2{,}0\div2{,}8$, зависит в большей степени от допустимого значения e_R, чем от $U_{к.ср}$.

Реактивная э.д.с. $e_R=2w_cA\xi v_a l_\delta\times10^{-6}$ *в*.

Найдем выражение для среднего напряжения между соседними коллекторными пластинами, принимая, что $E_н\approx U_н$:

$$U_{к.ср} = 2w_c\alpha_\delta B_\delta l_\delta v_a p/a\cdot10^{-6} \text{ в}.$$

Заменяя $2w_cAv_a=e_R/\xi A\cdot10^6$, получаем:

$$U_{к.ср} = \frac{\alpha_\delta B_\delta e_R}{\xi A}\frac{a}{p}, \text{ в}. \quad (12\text{-}126)$$

Подставив в (12-121) и (12-123) значение $U_{к.ср}$ по (12-126), найдем предельные мощности в зависимости от e_R (при $w_c=1$):

$$(P/D)_{e_R} = 0{,}157\frac{\alpha_\delta B_\delta e_R}{\xi}, \text{ квт/м}; \quad (12\text{-}127)$$

$$(Pn)_{e_R} = 3v_a\frac{\alpha_\delta B_\delta e_R}{\xi}, \text{ квт·об/мин}. \quad (12\text{-}128)$$

Как видим, предельные мощности (по допустимому значению e_R) не зависят от a/p; следовательно, они одни и те же как для одноходовых, так и для многоходовых обмоток.

Допустимое значение e_R принимается, как отмечалось, равным $e_R=6\div9$ *в* при $k_{пер}=2{,}0\div2{,}8$ и окружной скорости коллектора $v_к\leqslant50$ *м/сек*, пропорциональной v_a; e_R должна быть тем меньше, чем больше $k_{пер}$ и $v_к$.

Для современных крупных машин можно брать следующие значения α_δ, B_δ и ξ:

$\alpha_\delta=0{,}72\div0{,}75$ ($\alpha_\delta=0{,}75$ при $\tau=65$—70 *см* и $Z/2p=20$—22); $B_\delta=9\,000\div11\,000$ *гс* (соответственно при $f=100\div20$ *гц*); $\xi=4$.

Если принять средние значения $\alpha_\delta=0{,}73$; $e_R=7{,}5$ *в*; $B_\delta=10\,000$ *гс*; $\xi=4$, то по (12-127) и (12-128) получим:

$$(P/D)_{e_R} = 2\,150 \text{ квт/м}; \quad (12\text{-}129)$$

$$(P/n)_{e_R} = 2{,}88\cdot10^6, \text{ квт·об/мин}. \quad (12\text{-}130)$$

Из сравнения (12-122) и (12-125) с (12-129) и (12-130) следует, что при одноходовой обмотке предельная мощность машины ограничивается допустимым значением $U_{\text{к. ср}}$, а при двухходовой обмотке — допустимым значением e_R.

Для возбудителей турбогенераторов принимаются примерно следующие предельные значения: $\alpha_\delta=0{,}7$; $B_\delta=9\,000$ *гс*; $\xi=5$; $e_R=6$ *в*; $v_a=$ $=85$ *м/сек*. После подстановки этих значений в (12-128) при $n=$ $=3\,000$ *об/мин* получим $P_{\text{макс}}=$ $=650$ *квт*.

Возбудители для турбогенераторов обычно имеют $2p=4$. Они должны работать при форсировке возбуждения турбогенератора с током, превышающим номинальный примерно в 2 раза. Поэтому, учитывая также высокую окружную скорость якоря и коллектора, не следует брать e_R более 6 *в*.

Для современных турбогенераторов (с форсированным охлаждением обмотки ротора) при $P_{\text{н}}=$ $=150\div300$ *Мвт* требуются возбудители мощностью 850—1 300 *квт*. Машины постоянного тока при $n=$ $=3\,000$ *об/мин* на такие мощности не могут быть построены. Поэтому приходится в этих случаях соединять возбудитель с турбогенератором через редуктор для снижения скорости вращения возбудителя или устанавливать отдельный возбудительный агрегат пониженной скорости вращения. В последние годы с успехом стало применяться также ионное возбуждение.

Хотя полученные выше соотношения носят приближенный характер, они могут быть использованы в процессе проектирования машин предельной мощности с учетом принятых допущений.

При тщательном изготовлении машины, более совершенной конструкции коллектора и щеточного аппарата значения $U_{\text{к. ср}}$, e_R, A, v_a и $v_{\text{к}}$ могут быть повышены с соответствующим увеличением предельной мощности машины.

В машинах, предназначенных для относительно спокойной работы, предельная мощность может быть повышена при применении трехходовых обмоток, как это следует из (12-121). Однако здесь необходимы дальнейшие исследовательские работы и главным образом опытная проверка свойств таких обмоток при длительной эксплуатации [Л. 40].

12-16. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛЫХ МАШИН

К малым машинам постоянного тока относятся электродвигатели и генераторы мощностью от долей

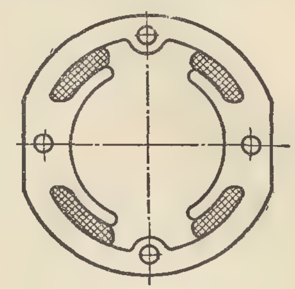


Рис. 12-18. Шихтованная станина микродвигателя.

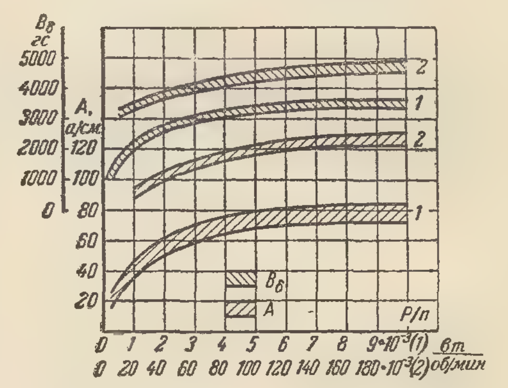


Рис. 12-19. Значения B_δ и A малых машин.

ватта до нескольких сотен ватт. Наибольшее распространение нашли исполнительные двигатели мощностью от нескольких единиц до сотен ватт, применяемые для привода различных механизмов и устройств, главным образом в системах автоматического управления. Двигатели малой мощности называются также микродвигателями. Конструктивно микродвигатели выполняются с шихтованной станиной совместно с полюсами (рис. 12-18) или со станиной из стальной трубы со съемными полюсами. Возбуждение микродвигателей может быть электро-

магнитным, от постоянных магнитов или смешанным. Обмотка возбуждения выполняется чаще всего последовательной, так как она обеспечивает лучшие условия пуска. Напряжение питания бывает различным: 6, 12, 27, 110 и 220 *в*. Микродвигатели с $P_н \leqslant 20$ *вт* могут иметь и параллельную обмотку возбуждения. Для мощностей $P_н \leqslant \leqslant 150 \div 200$ *вт* магнитную систему выполняют двухполюсной; при бо̀льших мощностях переходят к четырехполюсному исполнению. Главные размеры выбираются так же, как и в нормальных машинах. Полюсное

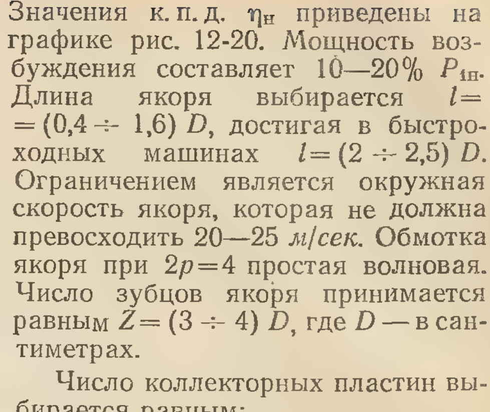


Рис. 12-20. Коэффициент полезного действия малых машин.

перекрытие $\alpha_\delta = 0,6 \div 0,7$; значения электромагнитных нагрузок приведены на рис. 12-19. Расчетная мощность P' вычисляется в предположении, что потери в цепи якоря составляют примерно $^2/_3$ всех потерь:

$$P' = \frac{1 + 2\eta_н}{3\eta_н} P_н.$$

Значения к. п. д. $\eta_н$ приведены на графике рис. 12-20. Мощность возбуждения составляет 10—20% $P_{1н}$. Длина якоря выбирается $l = (0,4 \div 1,6) D$, достигая в быстроходных машинах $l = (2 \div 2,5) D$. Ограничением является окружная скорость якоря, которая не должна превосходить 20—25 *м/сек*. Обмотка якоря при $2p=4$ простая волновая. Число зубцов якоря принимается равным $Z = (3 \div 4) D$, где D — в сантиметрах.

Число коллекторных пластин выбирается равным:

$$K = 2Z \text{ при } 2p = 2;$$

$$K = (1 \div 3) Z \text{ при } 2p = 4.$$

Форма пазов полузакрытая. Воздушный зазор δ принимается в пределах

$$\delta = (0,35 \div 0,45) \frac{b_\delta A}{B_{\delta н}}, \text{ см}.$$

Машины малой мощности выполняются без добавочных полюсов. Диаметр коллектора проверяется по допустимой ширине коллекторной пластины, которая не должна быть меньше 2 *мм*. Плотность тока в якоре выбирается по допустимому произведению $A\Delta$. В зависимости от скорости вращения якоря для защищенных самовентилируемых микромашин с изоляцией обмотки класса А значение $A\Delta$ принимается:

при $2p=2$	$n_н \leqslant 5\,000$ *об/мин*,	$A\Delta \approx 400 (1 + 0,1 v_a)$;
	$n_н = 5\,000 \div 10\,000$ *об/мин*,	$A\Delta \approx 340 (1 + 0,1 v_a)$;
при $2p=4$	$n_н \leqslant 5\,000$ *об/мин*.	$A\Delta \approx 310 (1 + 0,1 v_a)$;
	$n_н = 5\,000 \div 10\,000$ *об/мин*,	$A\Delta \approx 260 (1 + 0,1 v_a)$,

где v_a — окружная скорость якоря, *м/сек*.

Для закрытых машин произведение $A\Delta$ составляет 40—45% величины $A\Delta$ для защищенных машин. Выбор изоляции производится согласно указаниям гл. 3.

12-17. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Для пояснения изложенной выше методики расчета машин постоянного тока приводим два расчета: А. Расчет генератора смешанного возбуждения и Б. Расчет двигателя параллельного (шунтового) возбуждения.

А. Расчет генератора (смешанного возбуждения) 150 *квт*, 230 *в*, 1 450 *об/мин*

Генератор проектируется в защищенном исполнении с аксиальной вытяжной вентиляцией, с центробежным радиальным вентилятором на валу. Охлаждающий воздух засасывается через жалюзи щитов со стороны коллектора, омывает коллектор, проходит двумя параллельными потоками между катушками полюсов и через аксиальные каналы коллектора и якоря и выбрасывается через решетку заднего подшипникового щита. Вентилятор стальной клепаный установлен на валу со стороны заднего подшипникового щита. Изоляция обмоток класса В. Машина предназначена для общепромышленного применения с продолжительным режимом работы и должна удовлетворять требованиям ГОСТ 183-66.

а) Выбор главных размеров

1) Диаметр якоря выбирается по кривой рис. 12-4 для значения $P_н/n_н = 150/1\ 450 = 0{,}104$ *квт/(об/мин)*, где $P_н = 150$ *квт*, $n_н = 1450$ *об/мин*.

Предварительно $D=39$ *см*; принимаем нормализованный диаметр по табл. I-1:

$$D = 36{,}8 \text{ см}.$$

2. Число полюсов выбираем по рис. 12-7, $2p=4$; проверим по (12-12) ток щеточного болта $I_{щ.б}=I_{ан}/p=653/2=327 a < 1\ 000$ *а*; здесь $I_{ан} \approx \frac{P_н}{U_н} = \frac{150 \cdot 10^3}{230} = 653$ *а*.

3. Предварительное значение электромагнитных нагрузок: а) магнитная индукция в воздушном зазоре по рис. 12-2 $B_\delta = 8\ 200$ *гс*; б) линейная нагрузка якоря по рис. 12-2 $A=350$ *а/см*.

4. Расчетная мощность по (12-2)

$$P' = k_г P_н = 1{,}05 \cdot 150 = 157{,}5 \text{ квт},$$

где $k_г=1{,}05$ по табл. 12-5.

5. Принимаем расчетный коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_\delta=0{,}67$ (§ 12-3)

6. Предварительное значение расчетной длины якоря по (12-1)

$$l_\delta = \frac{6{,}1 P' \cdot 10^{11}}{\alpha_\delta A B_\delta D^2 n_н} = \frac{6{,}1 \cdot 157{,}5 \cdot 10^{11}}{0{,}67 \cdot 350 \cdot 8200 \cdot 36{,}8^2 \cdot 1450} = 25{,}5 \text{ см}.$$

Так как $l_\delta < 30$ *см*, то по (12-11) принимаем однопакетное исполнение якоря

$$l_\delta \approx l_1 = l = 25{,}5 \text{ см}.$$

7. Полюсное деление якоря

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 36{,}8}{4} = 28{,}8 \text{ см}.$$

8. Проверяем по (12-5) значение λ

$$\lambda = l/\tau = 25{,}5/28{,}8 = 0{,}882.$$

9. Окружная скорость якоря

$$v_a = \frac{\pi D n_н}{6000} = \frac{\pi \cdot 36{,}8 \cdot 1450}{6000} = 25{,}7 \text{ м/сек}.$$

10. При серийном производстве необходимо предусмотреть возможность выполнения на выбранном диаметре якоря машин смежных мощностей по шкале табл. 12-1 путем изменения длины якоря. Составим таблицу вариантов главных размеров (см. табл. 12-6А).

Таблица 12-6А

Варианты расчета главных размеров

№ варианта	D, *см*	B_δ, *гс*	A, *а/см*	τ, *см*	l_δ, *см*	λ	$\lambda' = \gamma'\lambda$	$\lambda'' = \lambda/\gamma''$
1	36,8	8 200	350	28,8	25,5	0,882	1,02	0,65
2	42,3	8 540	370	33,2	12,8	0,39	0,49	0,28

Здесь $\gamma' = 190/150 = 1{,}27$; $\gamma'' = 150/110 = 1{,}37$, где смежные мощности $P'_н = 190$ *квт* и $P''_н = 110$ *квт*. По значениям λ, λ' и λ'' вариант № 1 дает лучшие показатели; выбираем вариант № 1.

б) Обмотка якоря, число коллекторных пластин и пазов, размеры пазов и ярма якоря

11. Предварительное значение тока якоря по (12-20)

$$I_{ан} = \frac{P_н \cdot 10^3}{U_н}(1 + k_в) = \frac{150 \cdot 10^3}{230}(1 + 0{,}01) = 660 \ a,$$

где $k_в=0{,}01$ по табл. 12-5.

12. Число пазов якоря

$$Z = 2p\,(Z/2p) = 4\,(7 \div 12) = 28 \div 48,$$

где $(Z/2p) = 7 \div 12$ по табл. 12-8.

Принимаем $Z=40$.

13. Зубцовое деление якоря по (12-25)

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 36{,}8}{40} = 2{,}9 \text{ см}.$$

14. Согласно условию (12-19) принимаем $2a=4$, т. е. простую петлевую обмотку; имеем:

$$\frac{I_a}{2a}=\frac{660}{4}=165\ a.$$

Простая волновая обмотка непригодна, так как при $2a=2$ имеем:

$$I_a/2a=330\ a>250\div 300\ a \quad [\text{см. (12-19а)}].$$

15. Число проводников в пазу по (12-20)

$$N/Z=\frac{At_1\cdot 2a}{I_{ан}}=\frac{350\cdot 2,9\cdot 4}{660}=6,15.$$

Принимаем $N/Z=6$.

16. Полное число проводников якоря

$$N=Z\,(N/Z)=40\cdot 6=240.$$

17. Для выбора числа коллекторных пластин K составим таблицу вариантов 12-9А, используя соотношения (12-22):

Таблица 12-9А

Варианты выбора K, $u_п$ и w_c

№ варианта	$u_п$	$K=u_п Z$	$w_c=N/2K$	$U_{к.ср}$, *в*
1	1	40	3	2,3
2	3	120	1	7,7

Принимаем вариант № 2, обеспечивающий минимальное число витков в секции $w_c=1$ и $U_{к.ср}<16$ *в*; $u_п=3$; $K=120$.

18. Выбираем шаги обмотки якоря (см. гл. 3):

$$y_z=Z/2p=40/4=10;$$

$$y_1=u_п y_z=3\cdot 10=30.$$

19. Определим допустимую плотность тока обмотки якоря при изоляции класса В по (12-28)

$$\Delta_a=\frac{(A\Delta)_B}{A}=\frac{2200}{350}=6,3\ а/мм^2.$$

Здесь по (12-30) имеем:

$$(A\Delta)_B=(A\Delta)_A\,\frac{\rho_A}{\rho_B}\,\frac{\Theta_B}{\Theta_A}=1750\times$$

$$\times\frac{100+235}{120+235}\cdot\frac{120-40}{100-40}=2200\ а/см\cdot а/мм^2.$$

где $(A\Delta)_A=1750$ по рис. 12-3 при $D=36,8$ *см* для изоляции класса А;

$\vartheta_A=\Theta_A+\vartheta_0=100°$ С — допускаемый нагрев для изоляции класса А;

$\vartheta_B=\Theta_B+\vartheta_0=120°$ С — допускаемый нагрев для изоляции класса В;

$\vartheta_0=40°$ С — стандартная температура охлаждающего воздуха по ГОСТ 183-66.

20. Поперечное сечение проводника обмотки якоря (12-28)

$$s_a=\frac{I_{ан}}{2a\Delta}=\frac{660}{4\cdot 6,3}=26,2\ мм^2.$$

Выбираем по табл. IV-3 и IV-4 медный провод прямоугольного сечения с изоляцией марки ПСД; берем эффективный провод, состоящий из двух элементарных:

$$\text{размеры провода}\ \frac{(\text{голый})\ 2,1\times 6,9\ мм}{(\text{изолированный})\ 2,37\times 7,17};$$

поперечное сечение элементарного провода 14 $мм^2$; полное сечение эффективного провода $s_a=2\times 14=28\ мм^2$.

21. Предварительная высота паза по рис. 12-8

$$h_п=3,5\ см.$$

22. Минимальная толщина зубца по (6-2)

$$b_{z\,мин}=\frac{B_\delta\, t_1\, l_\delta}{k_c l B_{z\,макс}}=$$

$$=\frac{8400\cdot 2,9\cdot 25,5}{0,93\cdot 25,5\,(21000\div 23000)}=$$

$$=1,18\div 1,29\ см,$$

где $B_{z\,макс}=21\,000\div 23\,000$ *гс* (см. табл. 12-3);

$k_c=0,93$ — коэффициент заполнения шихтованного сердечника якоря при толщине листа электротехнической стали 0,5 *мм* и лакированных листах (табл. 2-4).

23. Предварительная ширина паза по (6-32)

$$b_п=\frac{\pi\,(D-2h_п)}{Z}-b_{z\,мин}=$$

$$=\frac{\pi\,(36,8-2\cdot 3,5)}{40}-(1,18\div 1,29)=$$

$$=1,06\div 0,95\ см.$$

24. По предварительно найденным размерам паза $h_п$ и $b_п$ размещаем проводники в пазу якоря согласно табл. VI-3; спецификация размещения приведена в табл. 12-14; поперечное сечение паза изображено на рис. 12-21.

25. Окончательные размеры паза в свету составляют:

$$h_п\times b_п=36\times 10,5\ мм.$$

Примечание. Обмотка якоря снабжена уравнительными соединениями, помещенными под лобовыми частями со стороны коллектора; сечение проводника уравнительного соединения 14 $мм^2$, что составляет 50% поперечного сечения эффективного проводника якоря; шаг уравнительных соединений $y_п=K/p=120/2=60$; число уравнительных соединений принято 20, т. е. одно соединение на три паза.

26. Предварительное значение э. д. с. якоря

$$E_{ая}=\frac{P'\cdot 10^3}{I_{ан}}=\frac{157,5\cdot 10^3}{660}\approx 240\ в.$$

27. Магнитный поток полюса

$$\Phi=\frac{60E_{ан}a\cdot 10^8}{pn_н N}=\frac{60\cdot 240\cdot 2\cdot 10^8}{2\cdot 1450\cdot 240}=$$

$$=4,13\cdot 10^6\ мкс.$$

Таблица 12-14

Спецификация паза

Позиция на рис. 12-21	Наименование	Число слоев по ширине	Число слоев по высоте	Толщина, *мм* по ширине	Толщина, *мм* по высоте
1	Провод изолированный 2,37×7,17 *мм*	—	2×2	3×2,37	2×2×7,17
2	Миканит гибкий 0,2 *мм*	2,5 оборота		1,0	1,0
3	Лента стеклянная 0,1 *мм*	1 встык		0,2	0,2
—	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	0,2	0,3
—	Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	—	—	1,4	1,5
4	Электрокартон ЭВ 0,2 *мм*	2	3	0,4	0,6
5	То же ЭВ 0,5 *мм*	—	1	—	0,5
6	То же ЭВ 0,3 *мм*	—	1	—	0,3
7	Миканит прокладочный 0,5 *мм*	—	1	—	0,5
—	Допуск на укладку	—	—	0,3	0,5
—	Всего изоляции на паз			2,1	5,4
8	Бандаж	—	—	—	1,5
	Всего			9,21	35,58

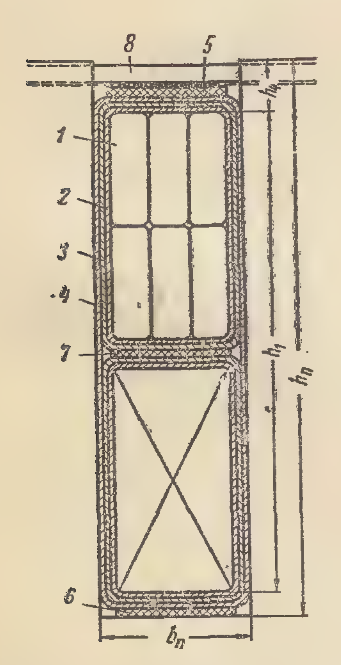


Рис. 12-21. Паз генератора.

28. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta н} = \frac{\Phi}{b_\delta\, l_\delta} = \frac{4,13\cdot 10^6}{19,3\cdot 25,5} = 8400\ гс,$$

где $b_\delta = \alpha_\delta\,\tau = 0,67\cdot 28,8 = 19,3$ *см*.

29. Предварительная высота ярма якоря

$$h_a \geqslant \frac{\Phi}{2k_c l B_a} = \frac{4,13\cdot 10^6}{2\cdot 0,93\cdot 25,5\,(10000 \div 15000)} = 8,7 \div 5,8\ см,$$

где $B_a = 10\,000 \div 15\,000$ *гс* (см. табл. 12-3).

В ярме якоря выполняем 35 аксиальных вентиляционных каналов диаметром $d_к = 2,0$ *см*, расположенных в два ряда, $m_к = 2$.

Расчетная высота ярма по (12-31)

$$h_a = \frac{D - 2h_п - d_c}{2} - \frac{2}{3} m_к d_к = \frac{36,8 - 2\cdot 3,6 - 10}{2} - \frac{2}{3}\cdot 2\cdot 2,0 = 7,5\ см,$$

где $d_c = 10$ *см* — средний диаметр вала; принимаем внутренний диаметр якоря $D' = d_c = 10$ *см*.

30. Расчетное сечение ярма

$$S_a = k_c l h_a = 0,93\cdot 25,5\cdot 7,5 = 178\ см^2$$

в) Размеры коллектора. Щетки

31. Диаметр коллектора по (12-33)

$$D_к = (0,6 \div 0,85)\,D = (0,6 \div 0,85)\,36,8 = 22 \div 31\ см.$$

Выбираем по табл. 12-11 нормализованный диаметр

$$D_к = 25\ см.$$

32. Коллекторное деление

$$t_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 25}{120} = 0{,}655 \ см.$$

33. Выбираем щетки марки ЭГ-4 (табл. 2-8);
допустимая плотность тока $\Delta_щ = 12$ *а/см²*;
удельное нажатие $p_щ = 0{,}15 \div 0{,}2$ *кГ/см²*;
коэффициент трения $k_{тр} = 0{,}2$;
переходное падение напряжения на пару щеток

$$2\Delta U_щ = 2 \ в;$$

размеры щетки (приложение V) $b_щ \times l_щ = 2 \times 3{,}2$ *см*;
перекрытие щеткой коллекторных делений

$$\beta_щ = b_щ t_к = 2/0{,}655 = 3{,}05.$$

34. Суммарная площадь щеточного контакта по (12-3)

$$\Sigma s_щ = \frac{2I_{ан}}{\Delta_щ} = \frac{2660}{12} = 110 \ см^2.$$

Выбираем число щеток на щеточный болт по (12-36)

$$N'_щ = \frac{\Sigma s_щ}{2pb_щ l_щ} = \frac{110}{4 \cdot 2 \cdot 3{,}2} = 4{,}3;$$

принимаем $N'_щ = 5$.

35. Общее число щеток $N_щ = 2pN'_щ = 4 \cdot 5 = 20$.

36. Полная длина коллектора с учетом шахматного расположения щеток (см. гл. 9) $L_к = 18{,}5$ *см*.

37. Окружная скорость коллектора

$$v_к = \frac{\pi D_к n_н}{6000} = \frac{\pi \cdot 25 \cdot 1450}{6000} = 19 \ м/сек.$$

г) Воздушный зазор. Размеры главного полюса. Ярмо станины

38. Воздушный зазор по (12-38)

$$\delta \geqslant \varkappa \frac{b_\delta A}{B_{\delta н}} = (0{,}37 \div 0{,}42) \frac{19{,}3 \cdot 342}{8400} = 0{,}29 \div 0{,}33 \ см,$$

где

$$A = \frac{NI_{ан}}{2a\pi D} = \frac{240 \cdot 660}{4\pi \cdot 36{,}8} = 342 \ а/см.$$

Принимаем $\delta = 0{,}33$ *см*.

39. Действительная длина полюсной дуги

$$b_p = b_\delta = 19{,}3 \ см.$$

40. Аксиальная длина полюса (полюс шихтованный)

$$l_m = l_p = l = 25{,}5 \ см$$

41. Ширина сердечника полюса по (12-3)

$$b_m \geqslant \frac{1{,}22\Phi}{0{,}98 l_m B_m} = \frac{1{,}22 \cdot 4{,}13 \cdot 10^6}{0{,}98 \cdot 25{,}5 (14000 \div 15000)} = 13 \div 14 \ см,$$

где 0,98 — коэффициент заполнения сталью шихтованного сердечника;

$$B_m = 14\,000 \div 15\,000 \ гс \text{ по табл. 12-3.}$$

Принимаем $b_m = 13$ *см*.

42. Сечение полюсного сердечника

$$S_m = 0{,}98 l_m b_m = 0{,}98 \cdot 25{,}5 \cdot 5 \cdot 13 = 325 \ см^2.$$

43. Высота боковых концов полюсных наконечников по (12-42)

$$h'_p \geqslant \frac{0{,}5 B_{\delta н} (b_p - b_m) l_\delta}{20\,000 l_p} = \frac{0{,}5 \cdot 84\,000 (19{,}3 - 13)}{20\,000} = 3 \ см.$$

44. Высота полюсного сердечника по рис. 12-10

$$h_m = 10 \div 13 \ см; \text{ принимаем } h_m = 13 \ см.$$

45. Аксиальная длина ярма статора (§ 12-8)

$$l_c = (1{,}2 \div 2{,}0) l_m = (1{,}2 \div 2{,}0) 25{,}5 = 31 \div 51 \ см.$$

Принимаем $l_c = 46{,}5$ *см*.

46. Поперечное сечение ярма статора по (12-44)

$$S_c = \frac{0{,}6\Phi}{B_c} = \frac{0{,}6 \cdot 4{,}13 \cdot 10^6}{(11\,000 \div 13\,000)} = 225 \div 190 \ см^2,$$

где $B_c = 11\,000 \div 13\,000$ *гс* по табл. 12-3 (стальной прокат). Принимаем $S_c = 200$ *см²*.

47. Высота ярма станины

$$h_c = \frac{S_c}{l_c} = \frac{200}{46{,}5} = 4{,}3 \ см.$$

48. Наружный диаметр станины (§ 12-8)

$$D_a = D + 2(\delta + h_m + h_c) = 36{,}8 + 2(0{,}33 + 13 + 3{,}3) = 72 \ см.$$

На рис. 12-22 приведены поперечный и продольный разрезы машины.

д) Расчет магнитной цепи. Характеристика холостого хода. Переходная характеристика

49. Магнитный поток якоря

$$\Phi = \frac{60 a E_a \cdot 10^8}{p n_н N} = \frac{60 \cdot 2 E_a \cdot 10^8}{2 \cdot 1450 \cdot 240} = 17{,}2 \cdot 10^3 E_a, \ мкс$$

50. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{b_\delta l_\delta} = \frac{17{,}2 \cdot 10^3 E_a}{19{,}3 \cdot 25{,}5} = 35 E_a, \ гс.$$

51. Коэффициент воздушного зазора по (12-79)

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_{\delta 3} = 1{,}2 \cdot 1{,}09 \cdot 1 = 1{,}31,$$

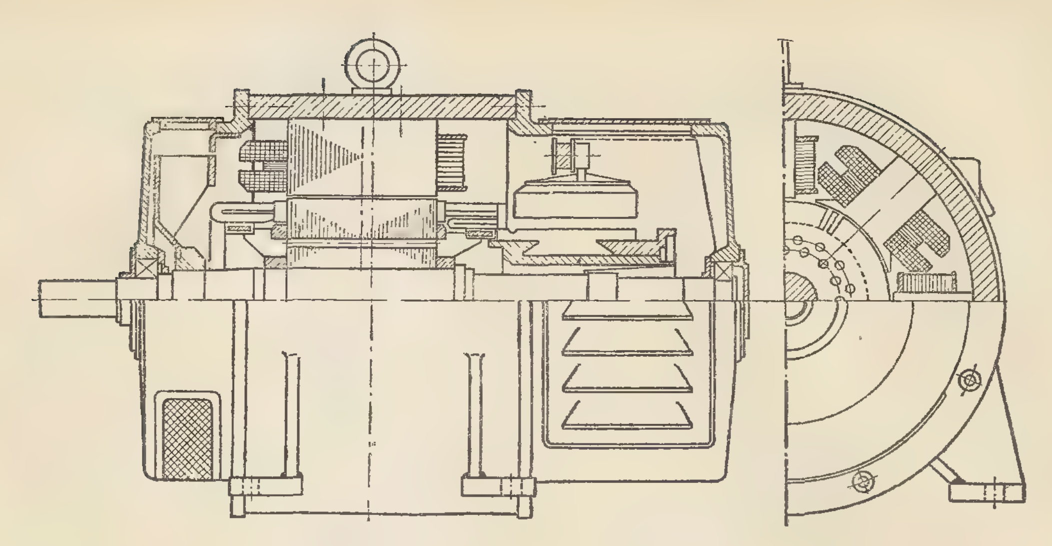


Рис. 12-22. Продольный и поперечный разрезы генератора.

где по (6-16)

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} = \frac{2,9 + 10 \cdot 0,33}{1,85 + 10 \cdot 0,33} = 1,2;$$

по (12-80)

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{\delta'' - \delta'}{\delta''(l_\delta / l_{бж} - 1) + \delta'} =$$

$$= 1 + \frac{0,56 - 0,4}{0,56(25,5/7,5 - 1) + 0,4} = 1,09;$$

$$\delta' = k_{\delta 1}\delta = 1,2 \cdot 0,33 = 0,4 \text{ см};$$

$$\delta'' = k''_\delta(\delta + h_{бж}) = 1,15(0,33 + 0,15) =$$
$$= 0,56 \text{ см};$$

$$k''_\delta = \frac{t_1 + 10(\delta + h_{бж})}{b_{z1} + 10(\delta + h_{бж})} =$$

$$= \frac{29 + 10(0,33 + 0,15)}{1,85 + 10(0,33 + 0,15)} = 1,15;$$

$$b_{z1} = 1,85 \text{ см};$$

$h_{бж} = 0,15$ — глубина бандажной канавки;
$l_{бж} = 7,5$ — суммарная аксиальная длина бандажных канавок;
$k_{\delta 3} = 1$, так как машина некомпенсированная.

52. Магнитное напряжение воздушных зазоров (на два полюса)

$$F_\delta = 1,6 B_\delta k_\delta \delta = 1,6 \cdot 35 E_a \cdot 1,31 \times$$
$$\times 0,33 = 24,2 E_a, \ a.$$

53. Ширина зубца:
на окружности якоря

$$b_{z1} = t_1 - b_п = 2,9 - 1,05 = 1,85 \text{ см};$$

на середине зубца

$$b_{z2} = t_2 - b_п = 2,62 - 1,05 = 1,57 \text{ см},$$

где

$$t_2 = \frac{\pi(D - h_п)}{Z} = \frac{\pi(36,8 - 3,6)}{40} = 2,62 \text{ см};$$

у основания зубца

$$b_{z3} = t_3 - b_п = 2,32 - 1,05 = 1,27 \text{ см},$$

где

$$t_3 = \frac{\pi(D - 2h_п)}{Z} =$$

$$= \frac{\pi(36,8 - 2 \cdot 3,6)}{40} = 2,32 \text{ см};$$

на $^1/_3$ высоты от основания зубца

$$b_{z1/3} = t_{1/3} - b_п = 2,52 - 1,05 = 1,47 \text{ см},$$

где

$$t_{1/3} = \frac{\pi(D - 4/3 h_п)}{Z} =$$

$$= \frac{\pi(36,8 - {}^4/_3 \cdot 3,6)}{40} = 2,52 \text{ см}.$$

54. Коэффициент $k_{п^1/_3}$ по (6-29) на $^1/_3$ высоты от основания зубца

$$k_{п1/3} = \frac{b_п l_\delta}{k_c l b_{z1/3}} = \frac{1,05 \cdot 25,5}{0,93 \cdot 25,5 \cdot 1,7} = 0,77.$$

55. Магнитная индукция в зубце по (6-2) на $^1/_3$ высоты зубца

$$B_{z1/3} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{k_c l b_{z1/3}} = \frac{35 E_a \cdot 2,9}{0,93 \cdot 1,47} = 74 E_a, \ гс.$$

56. Магнитное напряжение в зубцовом слое

$$F_z = 2 h_z H_{z1/3} = 2 \cdot 3,6 H_{z1/3} = 7,2 H_{z1/3}, \ a,$$

где $H_{z^1/_3}$ из табл. II-1.

57. Магнитная индукция в ярме якоря по (6-50)

$$B_a = \frac{\Phi}{2S_a} = \frac{17{,}2E_a \cdot 10^3}{2 \cdot 178} = 48{,}5E_a, \ гс.$$

58. Магнитное напряжение в ярме якоря

$$F_a = L_a H_a = 17{,}3H_a, \ a,$$

где H_a из табл. II-1;

$$L_a = \frac{\pi (D - 2h_п - h_a)}{2p} =$$

$$= \frac{\pi (36{,}8 - 2 \cdot 3{,}6 - 7{,}5)}{4} = 17{,}3 \ см.$$

59. Поток рассеяния главных полюсов по (6-61)

$$\Phi_\sigma = \frac{4{,}5 l_m b_m}{\tau} \left(F_\delta + F_z + F_a\right) =$$

$$= \frac{4{,}5 \cdot 25{,}5 \cdot 13}{28{,}8} F_{\delta za} = 52F_{\delta za}, \ мкс,$$

где $F_{\delta za} = F_\delta + F_z + F_a$.

60. Коэффициент магнитного рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{\Phi} = 1 + \Phi_\sigma / \Phi.$$

61. Поток сердечника главного полюса

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma \ .$$

62. Магнитная индукция в сердечнике главного полюса

$$B_m = \Phi_m / S_m = \Phi_m / 325, гс.$$

63) Магнитное напряжение сердечников главных полюсов

$$F_m = 2h_m H_m = 26H_m, \ a,$$

где H_m из табл. II-1.

64. Магнитное напряжение в зазоре между ярмом станины и сердечником полюса

$$F_{\delta m} = 2 \cdot 0{,}8 B_m \delta_m = 0{,}024 B_m, \ a,$$

где $\delta_m = 0{,}015$ *см*.

65. Магнитная индукция в ярме станины

$$B_c = \frac{\sigma \Phi}{2S_c} = \frac{\Phi_m}{400}, \ гс.$$

66. Магнитное напряжение в ярме станины

$$F_c = L_c H_c = 53H_c, \ a,$$

где

$$L_c = \frac{\pi (D_c - h_c)}{2p} = \frac{\pi (72 - 4{,}3)}{4} =$$

$$= 53 \ см.$$

Из табл. II-5 берем H_c.

67. Намагничивающая сила на пару полюсов

$$\Sigma F = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_{\delta m} + F_c, \ a.$$

68) Намагничивающая сила возбуждения на всю машину

$$F_0 = p \Sigma F, \ a.$$

По расчетным формулам пп. 49—68 составлена табл. 12-15, на основании данных которой на рис. 12-23 построены характеристики холостого хода $E_a = f(F_0)$ и $E_a = f(I_ш)$ и переходная характеристика $B_\delta = f(E_{\delta za})$; здесь $I_ш$ — ток шунтовой обмотки генератора.

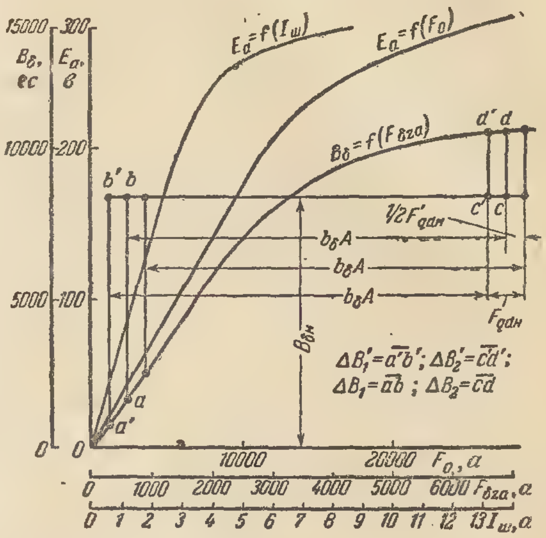


Рис. 12-23. Характеристика холостого хода и переходная характеристика генератора.

е) Расчет н.с. при нагрузке. Расчет обмоток возбуждения

Шунтовая обмотка возбуждения рассчитывается так, чтобы обеспечить при холостом ходе номинальное напряжение 230 *в*. Последовательная (сериесная) обмотка выбирается с учетом того, чтобы при номинальном режиме работы ее действие компенсировало падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря. Класс изоляции обмоток В.

69. Значение н. с. возбуждения при холостом ходе и $U_н = 230$ *в* по табл. 12-15 составляет $F_0 = 14\,350$ *а*.

Расчетное значение принимаем для запаса на 15% больше:

$$F_ш = 1{,}15F_0 = 1{,}15 \cdot 14\,800 = 17\,000 \ a.$$

70. Средняя длина шунтовой обмотки по (12-98)

$$l_{ш.ср} = 2(l_m + b_m + 4\Delta_{из}) + \pi b_к =$$
$$= 2\,(25{,}5 + 13 + 4 \cdot 0{,}2) + \pi \cdot 2{,}5 = 86{,}5 \ см,$$

где $\Delta_{из} = 0{,}2$ *см* — толщина изоляции сердечника полюса;

$b_к = 2{,}5$ *см* — предварительно выбранная ширина катушки.

71. Сечение проводника шунтовой обмотки

$$s_ш = \frac{k_\vartheta F_ш l_{ш.ср}}{5600 U_н} = \frac{1{,}4 \cdot 17\,000 \cdot 86{,}5}{5600 \cdot 230} =$$

$$= 1{,}6 \ мм^2,$$

где $k_\vartheta = 1{,}4$ из табл. 11-8.

Таблица 12-15

Данные расчета магнитной цепи генератора

E_a	%	26	50	83	100	126	104
	в	60	115	190	230	290	240
$\Phi = 17{,}2 \cdot 10^3 E_a$	*мкс*	$1{,}03 \cdot 10^6$	$1{,}98 \cdot 10^6$	$3{,}27 \cdot 10^6$	$3{,}96 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$4{,}13 \cdot 10^6$
$B_\delta = 35\, E_a$	*гс*	2 100	4 000	6 800	8 000	10 200	8 400
$F_\delta = 24{,}2\, E_a$	*а*	1 450	2 780	4 550	5 550	7 000	5 800
$B_{z_{1/3}} = 74\, E_a$	*гс*	4 450	8 500	14 100	17 100	21 500	17 700
$H_{z_{1/3}}$	*а/см*	1,55	3,5	16,4	82	590	110
$F_z = 7{,}2\, H_{z_{1/3}}$	*а*	11	24	118	590	4 250	830
$B_a = 48{,}5\, E_a$	*гс*	2 900	5 600	9 200	11 100	14 000	11 700
H_a	*а/см*	1,0	1,92	4,1	6,64	16	7,8
$F_a = 17{,}3\, H_a$	*а*	17,3	34	72	115	278	135
$F_{\delta za} = F_\delta + F_z + F_a$	*а*	1 478	2 838	4 740	6 250	11 250	6 730
$\Phi_\sigma = 52\, F_{\delta za}$	*мкс*	77 000	147 000	246 000	326 000	600 000	350 000
$\sigma = 1 + \Phi_\sigma / \Phi_m$	—	1,075	1,075	1,075	1,08	1,12	1,085
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$	*мкс*	$1{,}107 \cdot 10^6$	$2{,}13 \cdot 10^6$	$3{,}514 \cdot 10^6$	$4{,}28 \cdot 10^6$	$5{,}56 \cdot 10^6$	$4{,}47 \cdot 10^6$
$B_m = \Phi_m / 325$	*гс*	3 400	6 500	10 800	13 150	17 100	13 800
H_m	*а/см*	1,9	3,2	6,65	11,3	75,3	13,9
$F_m = 26\, H_m$	*а*	41	83	179	296	1 950	360
$F_{\delta m} = 0{,}024\, B_m$	*а*	82	157	260	314	412	332
$B_c = \Phi_m / 400$	*гс*	2 760	5 320	8 800	10 700	13 900	11 200
H_c	*а/см*	2,2	4,3	7,76	10,39	20,3	11,27
$F_c = 53\, H_c$	*а*	117	228	410	550	1 080	596
$\Sigma F = F_{\delta za} + F_m + F_{\delta m} + F_c$	*а*	1 700	3 310	5 590	7 410	14 910	8 020
$F_0 = 2\, \Sigma F$	*а*	3 400	6 620	11 200	14 800	29 820	16 040
$1/2\, F_{\delta za}$	*а*	739	1 420	2 370	3 125	5 760	3 365
$I_ш = F_0 / 4\,000$	*а*	0,85	1,65	2,8	3,7	7,45	4,0

Из табл. IV-1 и IV-4 выбираем проводник с изоляцией ПСД:

а) диаметр проводника

$$\frac{\text{голый}}{\text{изолированный}} = \frac{1{,}45}{1{,}72}\ мм;$$

б) сечение $s_ш = 1{,}65$ *мм²*.

72. Наибольший ток шунтовой обмотки

$$I_{ш.макс} = \Delta_ш s_ш = (2 \div 3)\, 1{,}65 = 3{,}3 \div 5\ a,$$

где $\Delta_ш = 2 \div 3$ *а/мм²* из табл. 12-12.

73. Число витков шунтовой обмотки на полюс

$$w_ш = \frac{F_ш}{2pI_{ш.макс}} = \frac{17\,000}{4\,(3{,}3 \div 5)} = 1\,290 \div 850;$$

принимаем $w_ш = 1\,000$ витков.

Катушку разбиваем на две части; в каждой половине принимаем по высоте 25 рядов, в каждом ряду 20 витков.

74. Сопротивление шунтовой обмотки: при 20° С

$$r_{ш20} = \frac{2pw_ш l_{ш.ср}}{5\,600 s_ш} = \frac{4 \cdot 1\,000 \cdot 86{,}5}{5\,600 \cdot 1{,}65} = 37{,}5\ ом;$$

при 120° С

$$r_{ш120} = k_\vartheta\, r_{ш20} = 1{,}4 \cdot 37{,}5 = 52{,}5 \text{ ом}.$$

75. Максимальный ток возбуждения

$$I_{ш.макс} = \frac{U_н}{r_{ш75}} = \frac{230}{52{,}5} = 4{,}4 \ a.$$

76. Номинальный ток шунтовой обмотки

$$I_{ш.н} = \frac{F_0}{2pw_ш} = \frac{14\,800}{4 \cdot 1\,000} = 3{,}7 \ a.$$

77. Сопротивление обмотки якоря: при 20° С

$$r_{a20} = \frac{Nl_{aср}}{5\,600\,(2a)^2 s_a} = \frac{240 \cdot 65{,}5}{5\,600 \cdot 4^2 \cdot 28} = 0{,}00625 \text{ ом};$$

где $l_{aср} = l + l_л = 25{,}5 + 40 = 65{,}5$ *см*;

$$l_л \approx 1{,}4\tau = 1{,}4 \cdot 28{,}8 = 40 \text{ см};$$

при 75° С

$$r_{a75} = k_\vartheta\, r_{a20} = 1{,}22 \cdot 0{,}00625 = 0{,}0076 \text{ ом};$$

при 120° С

$$r_{a120} = k_\vartheta\, r_{a20} = 1{,}4 \cdot 0{,}00625 = 0{,}00875 \text{ ом}.$$

78. Электродвижущая сила якоря при номинальной нагрузке

$$E_{ан} = U_н + I_{ан}\,(r_{a120} + r_{д120} + r_{с120}) + 2\Delta U_щ = 230 + 657\,(0{,}00875 + 0{,}00345 + 0{,}00065) + 2 = 230 + 8{,}4 + 2 \approx 240 \ в,$$

где действительный ток якоря

$$I_{ан} = I_н + I_{ш.н} = 653 + 3{,}7 = 657 \ a;$$

значения $r_{д120}$ и $r_{с120}$ см. далее, пп. 84 и 103.

79. Намагничивающая сила реакции якоря по (6-90) по переходной характеристике при $B_{\delta н} = 8\,400$ *гс*, величина $b_\delta A = 19{,}3 \cdot 342 = 6\,600$ *а*.

Из графика рис. 12-23 находим первоначально $\Delta B_1' = 8\,400$ *гс*, $\Delta B_2' = 2\,150$ *гс*;

$$F_{qd}' = \frac{1}{6}\,\frac{\Delta B_1' - \Delta B_2'}{\Delta B_1' + \Delta B_2'}\, b_\delta A = \frac{1}{6} \cdot \frac{8\,400 - 2\,150}{8\,400 + 2\,150} \cdot 6\,600 = 650 \ a.$$

Передвигая основание криволинейной трапеции на рис. 12-23 направо на $^1/_2\, F_{qd}' = 325$ *а*, находим усредненные значения $\Delta B_1 = 7\,500$ *гс*, $\Delta B_2 = 2\,200$ *гс* и н. с. F_{qd}:

$$F_{qd} = \frac{1}{6} \cdot \frac{8\,400 - 2\,150}{7\,500 + 2\,200} \cdot 6\,600 = 710 \ a.$$

Следовательно, $F_{р.я} = F_{qd} = 4 \cdot 710 = 2\,840$ *а*.

80. Намагничивающая сила сериесной обмотки по (12-87)

$$F_с = F_E + F_{р.я} - F_{ш.н} = 16\,040 + 2\,840 - 14\,800 \approx 4\,080 \ a,$$

где $F_E = 16\,040$ *а* при $E_{ан} = 240$ *в* по кривой $E_a = f(F_0)$.

81. Число витков сериесной обмотки на полюс при двух параллельных ветвях обмотки ($a_{с.о} = 2$)

$$w_{с.о} = \frac{F_{с.о}a_{с.о}}{2pI_{ан}} = \frac{4\,080 \cdot 2}{4 \cdot 657} = 3{,}1;$$

принимаем $w_{с.о} = 3$ витка.

82. Сечение проводников сериесной обмотки (§ 12-12)

$$s_{с.о} = \frac{I_{ан}}{a_{с.о}\Delta_{с.о}} = \frac{657}{2\,(2{,}4 \div 3{,}6)} = 91 \div 136 \text{ мм}^2,$$

$$\text{где } \Delta_{с.о} \approx 1{,}2\Delta_ш = 1{,}2\,(2 \div 3) = 2{,}4 \div 3{,}6 \ a/мм^2.$$

Примем голую медь с размерами (см. табл. IV-3 и IV-4) 3,8×25 *мм*; витки исполняем гнутые на ребро; сечение проводника $s_{с.о} = 94{,}5$ *мм*².

83. Среднюю длину витка сериесной обмотки (п. 70) принимаем $l_{с.о.ср} \approx l_{ш.ср} = 86{,}5$ *см*.

84. Сопротивление сериесной обмотки: при 20° С

$$r_{с20} = \frac{2pw_{с.о}l_{с.ср}}{5\,600 a_с^2\, s_{с.о}} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 81{,}5}{5\,600 \cdot 2^2 \cdot 94{,}5} = 0{,}00046 \text{ ом};$$

при 75° С

$$r_{с75} = 1{,}22 \cdot 0{,}00046 \approx 0{,}0006 \text{ ом};$$

при 120° С

$$r_{с120} = 1{,}4 \cdot 0{,}00046 = 0{,}00065 \text{ ом}.$$

ж) Коммутация. Расчет добавочных полюсов

85. Укорочение шага

$$\varepsilon_к = K/2p - u_п y_z = \frac{120}{4} - 3 \cdot 10 = 0.$$

86. Коммутационная зона по (12-50)

$$b_{к.з} = b_щ' + t_к'\left(u_п + \varepsilon_к - a/p\right) = 2 \cdot \frac{36{,}8}{25} + 0{,}655 \cdot \frac{36{,}8}{25}\,(3 - 1) = 4{,}86 \text{ см}.$$

87. Коэффициенты удельной магнитной проводимости коммутируемых секций:

а) $\lambda_п$ по (7-23) и рис. 12-21

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_4}{b_п} = \frac{28}{3 \cdot 10{,}5} + \frac{2}{10{,}5} = 1{,}6,$$

где $h_1 = 28$ *мм*; $b_п = 10{,}5$ *мм*; $h_4 = 7$ *мм*;

б) λ_z по (12-48а)

$$\lambda_z = 0{,}15\,\frac{b_{рд}}{k_{\delta д}\,\delta_д} = 0{,}15 \cdot \frac{3{,}5}{1{,}17 \cdot 0{,}44} = 1{,}0,$$

где $b_{рд} = 3{,}5$ *см* (см. п. 91); $\delta_д = 0{,}44$ *см*; $k_{\delta д} = 1{,}17$ (см. пп. 92 и 93);

в) $\lambda_{бж}$ по (12-49)

$$\lambda_{бж} \approx \frac{30\,000\, S_{бж}}{A b_{к.з}\, l_\delta} =$$

$$= \frac{30\,000 \cdot 0{,}55}{342 \cdot 4{,}86 \cdot 25{,}5} = 0{,}39,$$

где $S_{бж}=0{,}55$ *см*² — суммарное поперечное сечение проволочных бандажей на сердечнике якоря;

г) $\lambda_л$ по (12-51)

$$\lambda_л = 0{,}5 l_л / l_\delta = 0{,}5 \cdot 40/25{,}5 = 0{,}79.$$

88. Коэффициент средней магнитной проводимости коммутируемых секций по (12-47)

$$\xi = 0{,}4\pi\,(k_\lambda \lambda_п + k_\lambda \lambda_z + \lambda_{бж} + \lambda_л) =$$

$$= 0{,}4\pi\,(1{,}4 \cdot 1{,}6 + 1{,}4 \cdot 1{,}0 +$$

$$+ 0{,}39 + 0{,}79) \approx 6,$$

где $k_\lambda=1{,}4$ из рис. 12-11 при $\beta_щ=3{,}06$; $\varepsilon_к=0$ и $u_п=3$.

89. Среднее значение реактивной э. д. с. в коммутируемой секции по (12-45)

$$e_R = 2 w_с v_a A \xi l_\delta \cdot 10^{-6} =$$

$$= 2 \cdot 1 \cdot 25{,}7 \cdot 342 \cdot 6 \cdot 25{,}5 \cdot 10^{-6} = 2{,}7\ в.$$

90. Среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре добавочного полюса по (12-65)

$$B_к = \xi A + \frac{(\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с})\, a \cdot 10^6}{2 w_с v_a l_\delta p \beta_щ} =$$

$$= 6 \cdot 342 + \frac{1{,}5 \cdot 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 25{,}7 \cdot 25{,}5 \cdot 2 \cdot 3{,}06} =$$

$$= 2\,050 + 375 = 2\,425\ гс,$$

где принимаем $\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с} = 1{,}5$ *в*.

91. Размеры полюсного наконечника:

а) по (12-66) $b_{рд} = (0{,}65 \div 0{,}75)\ b_{кз} = (0{,}65 \div 0{,}75) \cdot 4{,}86 = 3{,}25 \div 3{,}65$ *см*; примем $b_{рд}=3{,}5$ *см*;

б) по (12-62) $l_{рд}=l_\delta=25{,}5$ *см*.

92. Воздушный зазор под добавочным полюсом по § 12-9б $\delta_д = (0{,}012 \div 0{,}01)\ D = (0{,}012 \div 0{,}01)\ 36{,}8 = 0{,}442 \div 0{,}37$ *см*; принимаем $\delta_д=0{,}44$ *см*.

93. Коэффициент воздушного зазора по (12-73а)

$$k_{\delta д} = \frac{t_1 + 10\delta_д}{b_{z1} + 10\delta_д} = \frac{2{,}9 + 10 \cdot 0{,}44}{1{,}85 + 10 \cdot 0{,}44} = 1{,}17.$$

94. Магнитный поток в воздушном зазоре по (12-67)

$$\Phi_д = B b_{рд} l_{рд} = 2425 \cdot 3{,}5 \cdot 25{,}5 =$$

$$= 0{,}216 \cdot 10^6\ мкс.$$

95. Намагничивающая сила обмотки добавочных полюсов по (12-73)

$$F_д = 1{,}1 \cdot 1{,}6\, B_к k_{\delta д} \delta_д + A\tau =$$

$$= 1{,}1 \cdot 1{,}6 \cdot 2425 \cdot 1{,}17 \cdot 0{,}44 +$$

$$+ 342 \cdot 28{,}8 = 12\,000\ а.$$

96. Магнитный поток рассеяния добавочного полюса по (12-68)

$$\Phi_{\sigma д} = F_д l_{рд} \lambda_{\sigma д} = 12\,000 \cdot 25{,}5 \cdot 1{,}47 =$$

$$= 0{,}45 \cdot 10^6\ мкс,$$

где по (12-68а)

$$\lambda_{\sigma д} = H'/L' + H''/L'' + 0{,}75 H'''/L''' =$$

$$= {}^1/_4 + {}^3/_5 + 0{,}75 \cdot {}^{10}/_{12} \approx 1{,}47;$$

значения $H'=1$ *см*, $H''=3$ *см*, $H'''=10$ *см*, $L'=4$ *см*, $L''=5$ *см* и $L'''=12$ *см* взяты по рис. 12-14 и 12-22.

97. Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса по (12-69)

$$\Phi_{тд} = \Phi_д + \Phi_{\sigma д} = (0{,}216 + 0{,}45) \cdot 10^6 =$$

$$= 0{,}66 \cdot 10^6\ мкс.$$

98. Коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов по (12-69а)

$$\sigma_д = \frac{\Phi_{тд}}{\Phi_д} = \frac{0{,}66 \cdot 10^6}{0{,}216 \cdot 10^6} = 3{,}05.$$

99. Максимальные индукции в ярмах сердечника якоря и станины по (12-70)

$$B_{a\,макс} = \frac{\Phi + 1{,}5\Phi_д}{2 S_a} =$$

$$= \frac{(4{,}13 + 1{,}5 \cdot 0{,}216) \cdot 10^6}{2 \cdot 178} = 12\,500\ гс;$$

$$B_{m\,макс} = \frac{\Phi_m + 1{,}5\Phi_{тд}}{2 S_m} =$$

$$= \frac{(4{,}47 + 1{,}5 \cdot 0{,}66) \cdot 10^6}{2 \cdot 200} = 13\,700\ гс.$$

100. Поперечное сечение сердечника добавочного полюса по (12-71)

$$S_{тд} = \frac{\Phi_{тд}}{B_{тд}} = \frac{0{,}66 \cdot 10^6}{6000 \div 6500} =$$

$$= 110 \div 100\ см^2;$$

принимаем $S_{тд}=102$ *см*² с размерами сердечника:

а) $l_{тд}=l_{рд}=l=25{,}5$ *см*; б) $b_{тд}=4$ *см*.

101. Число витков на полюс обмотки добавочных полюсов по (12-74)

$$w_д = \frac{F_д a_д}{2 I_{ан}} = \frac{12\,000 \cdot 2}{2 \cdot 657} = 18{,}3$$

$$при\ a_д = a_с = 2;$$

принимаем $w_д=19$ витков.

102. Размеры проводника обмотки добавочных полюсов принимаем одинаковыми с размерами проводника сериесной обмотки (см. п. 82); размещение обмотки в один ряд, 19 витков по высоте, проводники гнуты на ребро; а) высота катушки $h_к=7{,}5$ *см*; б) ширина катушки $b_к=2{,}7$ *см*.

103. Сопротивление обмотки добавочных полюсов:

а) при 20° С

$$r_{д20} = \frac{2 p w_д l_{д.ср}}{5\,600 a_д^2 s_д} =$$

$$= \frac{4 \cdot 19 \cdot 69}{5\,600 \cdot 2^2 \cdot 94{,}5} = 0{,}00248 \text{ ом},$$

где по (12-98) $l_{д\text{-ср}} =$

$$= 2(l_{тд} + b_{тд} + 4\Delta_{из}) + \pi b_к =$$

$$= 2(25{,}5 + 4 + 4 \cdot 0{,}2) + \pi \cdot 2 \cdot 7 = 69 \text{ см};$$

б) при 120° С

$$r_{д120} = k_\vartheta \; r_{д20} =$$

$$= 1{,}4 \cdot 0{,}00248 \approx 0{,}00345 \text{ ом};$$

в) при 75° С

$$r_{д75} = 1{,}22 \cdot 0{,}00248 = 0{,}003 \text{ ом},$$

где k_ϑ из табл. 11-8.

з) Потери и к. п. д.

104. Вес стали ярма сердечника якоря

$$G_a = 7{,}8 \cdot 2pL_a S_a \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 4 \cdot 17{,}3 \cdot 178 \cdot 10^{-3} = 97 \text{ кг}.$$

105. Вес зубцов якоря

$$G_z = 7{,}8 Z h_z k_c l b_{z2} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 7{,}8 \cdot 40 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}93 \cdot 25{,}5 \cdot 1{,}57 \cdot 10^{-3} = 42 \text{ кг},$$

где $h_z = h_п = 3{,}6$ см.

106. Частота перемагничивания стали якоря

$$f = \frac{pn_н}{60} = \frac{2 \cdot 1\,450}{60} = 48{,}5 \text{ гц}.$$

107. Основные потери в стали ярма якоря по (8-23)

$$P_{ca} = C_a \left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 G_a =$$

$$= 11{,}5 \cdot 1{,}17^2 \cdot 97 = 1500 \text{ вт},$$

где

$$C_a = \frac{f(f + 70)}{500} = \frac{48{,}5\,(48{,}5 + 70)}{500} = 11{,}5;$$

$B_a = 11\,700$ гс по табл. (12-15)

108. Основные потери в стали зубцов якоря по (8-25)

$$P_{cz} = C_z \left(\frac{B_{z2}}{10\,000}\right)^2 G_z =$$

$$= 10{,}9 \cdot 1{,}66^2 \cdot 2 = 1\,260 \text{ вт},$$

$$\text{где } C_z = \frac{f(f + 30)}{350} =$$

$$+ \frac{48{,}5\,(48{,}5 + 30)}{350} = 10{,}9;$$

$$B_{z2} = B_{z1/3} \; \frac{b_{z1/3}}{b_{z2}} =$$

$$= 17\,700 \cdot \frac{1{,}7}{1{,}57} = 16\,600 \text{ гс};$$

$B_{z1/3} = 17\,700$ по табл. (12-15).

109. Поверхностные потери полюсных наконечников по (8-29)

$$P_{пов} = 2p\tau\alpha_p l_p \, p_{пов} =$$

$$= 4 \cdot 28{,}8 \cdot 0{,}67 \cdot 25{,}5 \cdot 8{,}89 \cdot 10^{-4} = 175 \text{ вт},$$

где по (8-28)

$$p_{пов} = k_0 \left(\frac{Zn_н}{10\,000}\right)^{1{,}5} \left(\frac{B_0 t_1}{1\,000}\right)^2 =$$

$$= 2\left(\frac{40 \cdot 1\,450}{10\,000}\right)^{1{,}5} \left(\frac{2\,200 \cdot 2{,}9}{1\,000}\right)^2 = 880 \text{ вт/м}^2;$$

по (8-27) $B_0 = \beta_0 k_\delta B_\delta =$

$$= 0{,}2 \cdot 1{,}31 \cdot 8\,400 = 2\,200 \text{ гс};$$

$\beta_0 = 0{,}2$ по рис. 8-4.

110. Полные потери в стали по (8-36)

$$P_c = P_{ca} + P_{cz} + P_{пов} =$$

$$= 1\,500 + 1\,260 + 175 = 2\,935 \text{ вт}.$$

111. Механические потери в подшипниках и на вентиляцию

$$P'_{мех} = (2 \div 3\%)\, P_н =$$

$$= 0{,}02 \cdot 150 \cdot 10^3 = 3\,000 \text{ вт}.$$

112. Механические потери щеточного контакта по (8-8)

$$P_{тр.щ} = 9{,}81 k_{тр} \, p_щ \, S_щ \, v_к =$$

$$= 9{,}81 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}15 \cdot 128 \cdot 19 = 720 \text{ вт},$$

где $S_щ = N_щ \, b_щ \, l_щ = 20 \cdot 2 \cdot 3{,}2 = 128$ см²;

$v_к = 19$ м/сек, см. п. 37.

113. Полные механические потери

$$P_{мех} = P'_{мех} + P_{тр.щ} =$$

$$= 3\,000 + 720 = 3\,720 \text{ вт}.$$

114. Электрические потери в обмотке якоря (согласно ГОСТ 183-66 определяются при расчетной рабочей температуре $\vartheta = 75°$ С)

$$P_{эа} = I^2_{ан} \, r_{а75} = 657^2 \cdot 0{,}0076 = 3\,240 \text{ вт}.$$

115. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$P_{э.д} = I^2_{ан} \, r_{д75} = 657^2 \cdot 0{,}003 = 1\,290 \text{ вт}.$$

116. Электрические потери в сериесной обмотке

$$P_{э.с} = I^2_{ан} \, r_{с75} = 657^2 \cdot 0{,}0006 = 260 \text{ вт}.$$

117. Электрические потери в щеточном контакте

$$P_{э.щ} = 2\Delta U_щ \, I_{ан} = 2 \cdot 657 = 1\,314 \text{ вт}.$$

118. Электрические потери на возбуждение шунтовой обмотки:

а) полные потери

$$P_ш = U_н \, I_{ш.н} = 230 \cdot 3{,}7 = 850 \text{ вт};$$

б) в шунтовой обмотке

$$P_{э.ш} = I^2_{ш.н} \, r_{ш75} = 3{,}7^2 \cdot 46 \approx 630 \text{ вт}$$

119. Добавочные потери при нагрузке (по § 8-7).

$$P_{доб} = 0{,}01 P_н = 0{,}01 \cdot 150 \cdot 10^3 = 1\,500 \text{ вт}.$$

Примечание. Расчет добавочных электрических потерь в обмотке якоря по (8-51) дал ничтожную величину этих потерь.

120. Полные потери генератора при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_э + P_ш + P_с + P_{доб} + P_{мех} =$$
$$= 6\,100 + 850 + 2\,935 + 1\,500 + 3\,720 =$$
$$= 15\,109 \text{ вт} \approx 15 \text{ квт},$$

где $P_э = P_{эа} + P_{э.д} + P_{э.с} + P_{э.щ} = 3\,240 + 1\,290 + 260 + 1\,314 = 6\,100$ *вт*.

121. Коэффициент полезного действия генератора при номинальной нагрузке

$$\eta_н = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_н + \Sigma P}\right) \cdot 100\% =$$
$$= \left(1 - \frac{15}{15 + 150}\right) \cdot 100\% = 90{,}6\%.$$

и) Вентиляционный расчет

На рис. 12-24 показан схематический чертеж распределения воздушных струй охлаждающего воздуха. Воздух входит в машину через жалюзи *1* переднего подшипникового щита и расширяется в пространстве *2* над коллектором. Затем воздух разделяется на две струи. Первая струя попадает на вход *3* к межполюсным окнам *4*, образующим вентиляционные каналы для охлаждения поверхностей катушек возбуждения. При выходе *5* из этих каналов воздух расширяется и поступает в вентилятор. Вторая струя из пространства над коллектором попадает на вход *6* к вентиляционным каналам *7* коллекторной втулки. Далее на выходе *8* из каналов струя расширяется в пространстве под лобовыми частями обмотки якоря и вновь сужается на входе *9* в аксиальные вентиляционные каналы *10* якоря. При выходе *11* из каналов струя воздуха расширяется и совместно с первой струей поступает в вентилятор. Из вентилятора весь охлаждающий воздух поступает в окружающее вентилятор пространство и, пройдя через защитную сетку *12*, выходит в окружающую атмосферу с потерей скоростного напора.

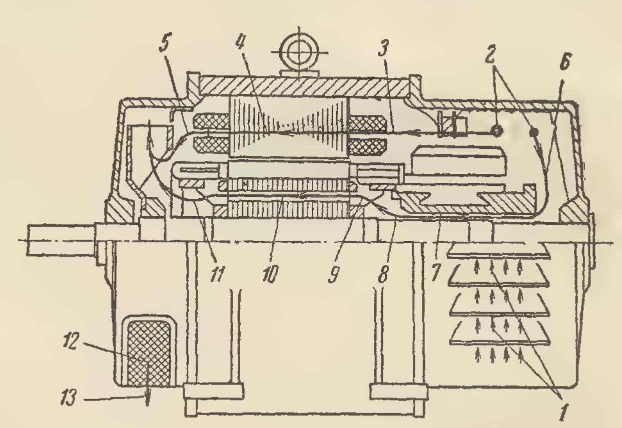


Рис. 12-24. Схема движения воздушных струй.

Соответственно движению струй на рис. 12-25 представлена схема замещения вентиляционной системы генератора. Расчет аэродинамических сопротивлений схемы приведен ниже. Индексы у сопротивлений на схеме соответствуют участкам схематического чертежа рис. 12-24.

1. Вход воздуха через жалюзи подшипникового щита

$$Z_1 = \frac{\xi_1}{S_1^2} = \frac{61 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} \approx 24,$$

где $\xi_1 = 61 \cdot 10^{-3}$ по (10-13) для острых краев;

$S_1 = 50 \cdot 10^{-3}$ $м^2$ — площадь входных окон.

2. Внезапное расширение над коллектором по (10-15)

$$Z_2 = \frac{\xi_2}{S_1^2} = \frac{27 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 11,$$

где $\xi_2 = 61 \cdot 10^{-3} (1 - S_1/S_2)^2 =$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{50}{150}\right)^2 = 27 \cdot 10^{-3};$$

$S_2 = 150 \cdot 10^{-3}$ $м^2$ — площадь пространства над коллектором.

3. Вход в пространство между полюсными катушками

$$Z_3 = \frac{\xi_3}{S_4^2} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{(24 \cdot 10^{-3})^2} = 52,$$

где $\xi_4 = 30 \cdot 10^{-3}$ (по 10-12);

$S_4 = 24 \cdot 10^{-3}$ $м^2$ — площадь поперечного сечения межполюсных окон.

4. Трение в межполюсных окнах по (10-20)

$$Z_4 = \frac{\xi_4}{S_4^2} = \frac{62{,}5 \cdot 10^{-3}}{(24 \cdot 10^{-3})^2} = 108,$$

где $\xi_4 = 61 \cdot 10^{-3} \lambda l / d_э =$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}08 \cdot \frac{25{,}5}{2} = 62 \cdot 10^{-3};$$

$\lambda = 0{,}08$ по (10-21);

$l = 25{,}5$ *см* — длина межполюсного окна (канала);

$$d_э = \sqrt{\frac{4S_4'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3}{\pi}} = 2 \text{ см}$$

$d_э$ — эквивалентный диаметр одного окна;

$S_4' = S_4/4p = 24/8 = 3$ *см*² — поперечное сечение одного окна.

5. Выход из межполюсных окон по (10-15)

$$Z_5 = \frac{\xi_5}{S_4^2} = \frac{43 \cdot 10^{-3}}{(24 \cdot 10^{-3})^2} = 75,$$

где

$$\xi_5 = 61 \cdot 10^{-3} (1 - S_4/S_5)^2 =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} (1 - 24/150)^2 = 43 \cdot 10^{-3};$$

$S_5 = 150 \cdot 10^{-3}$ *м*² — площадь пространства над лобовыми частями обмотки якоря со стороны заднего подшипникового щита.

9. Вход в аксиальные вентиляционные каналы якоря

$$Z_9 = \frac{\xi_9}{S_{10}^2} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{(11 \cdot 10^{-3})^2} = 250,$$

где $\xi_9 = 30 \cdot 10^{-3}$ по (10-12), вход с прямоугольными краями;

$$S_{10} = n_к \frac{\pi d_к^2}{4} \cdot 10^{-4} = 35 \frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot 10^{-4} =$$

$= 11 \cdot 10^{-3}$, *м*² — поперечное сечение вентиляционных каналов якоря (число каналов 35, диаметр каналов 2 *см*).

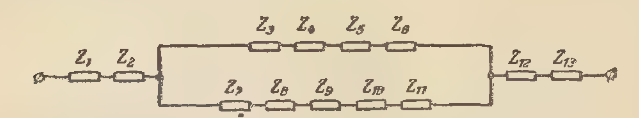


Рис. 12-25. Схема замещения вентиляционной системы.

6. Вход в вентиляционные каналы коллекторной втулки

$$Z_6 = \frac{\xi_6}{S_7^2} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{(11{,}5 \cdot 10^{-3})^2} = 210,$$

где $\xi_6 = 30 \cdot 10^{-3}$ по (10-12) при входе с прямоугольными краями;

$S_7 = 11{,}5 \cdot 10^{-3}$ *м*² — поперечное сечение каналов коллекторной втулки.

7. Трение в каналах коллекторной втулки по (10-20)

$$Z_7 = \frac{\xi_7}{S_7^2} = \frac{21{,}2 \cdot 10^{-3}}{(11{,}5 \cdot 10^{-3})^2} = 160,$$

$$где\ \xi_7 = 61 \cdot 10^{-3} \lambda l/d_э =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}08 \cdot \frac{15}{3} = 21{,}2 \cdot 10^{-3};$$

$\lambda = 0{,}08$ по (10-21);

$l = 15$ *см* — длина канала коллекторной втулки;

$d_э = 3$ *см* — ширина кольцевого канала коллекторной втулки по (10-23).

8. Выход из каналов коллекторной втулки

$$Z_8 = \frac{\xi_8}{S_7^2} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{(11{,}5 \cdot 10^{-3})^2} = 125,$$

$$где\ \xi_8 = 61 \cdot 10^{-3} (1 - S_7/S_8)^2 =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{11{,}5}{26}\right)^2 = 18 \cdot 10^{-3};$$

$S_8 = 26 \cdot 10^{-3}$ *м*² — площадь пространства под лобовыми частями обмотки якоря (рис. 12-22).

10. Трение в вентиляционных каналах якоря

$$Z_{10} = \frac{\xi_{10}}{S_{10}^2} = \frac{61 \cdot 10^{-3}}{(11 \cdot 10^{-3})^2} = 510,$$

$$где\ \xi_{10} = 61 \cdot 10^{-3} \lambda l_к/d_к =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}08 \cdot \frac{25{,}5}{2} \cdot 10^{-3} \approx 61 \cdot 10^{-3};$$

$l_к = 25{,}5$ *см* — длина канала.

11. Выход из вентиляционных каналов якоря

$$Z_{11} = \frac{\xi_{11}}{S_{10}^2} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{(11 \cdot 10^{-3})^2} = 165,$$

$$где\ \xi_{11} = 61 \cdot 10^{-3} (1 - S_{10}/S_{11})^2 =$$

$$= 61 \cdot 10^{-3} (1 - 11/26)^2 = 20 \cdot 10^{-3};$$

$S_{11} = 26 \cdot 10^{-3}$ *м*² — площадь пространства под лобовыми частями обмотки якоря со стороны заднего подшипникового щита (рис. 12-22).

12. Проход через сетку выходного отверстия

$$Z_{12} = \frac{\xi_{12}}{S_{12}^2} = \frac{12{,}5 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 5,$$

где $\xi_2 = 12{,}5 \cdot 10^{-3}$ по (10-13);

$S_2 = 50 \cdot 10^{-3}$ *м*² — поперечное сечение выхода в сетке.

13. Потеря скоростного напора при выходе воздуха в атмосферу

$$Z_{13} = \frac{\xi_{13}}{S_{12}^2} = \frac{61 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} \approx 24.$$

14. Суммарное сопротивление для струи воздуха, проходящей между полюсными катушками (рис. 12-24 и 12-25),

$$Z_I = Z_3 + Z_4 + Z_5 = 52 + 108 + 75 = 235.$$

15. Суммарное сопротивление для струи воздуха, проходящей через вентиляционные каналы якоря,

$$Z_{II} = Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} =$$
$$= 210 + 160 + 125 + 250 + 510 + 165 = 1420.$$

16. Эквивалентное сопротивление для параллельных струй воздуха по (10-32)

$$Z_э = \frac{Z_I\, Z_{II}}{\left(\sqrt{Z_I} + \sqrt{Z_{II}}\right)^2} =$$
$$= \frac{235 \cdot 1420}{\left(\sqrt{235} + \sqrt{1420}\right)^2} = 120.$$

17. Полное сопротивление вентиляционной системы

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_э + Z_{12} + Z_{13} =$$
$$= 24 + 11 + 120 + 5 + 24 = 184.$$

18. Уравнение характеристики вентиляционной системы по (10-2)

$$H = ZV^2 = 184V^2.$$

19. Распределение струй воздуха по параллельным ветвям по (10-3)

$$\frac{V_1}{V_{II}} = \sqrt{\frac{Z_{II}}{Z_I}} = \sqrt{\frac{1420}{235}} = 2,46.$$

к) Расчет вентилятора

Принимая направление вращения генератора неизменным, выбираем центробежный вентилятор с лопатками, наклоненными назад против вращения колеса (рис. 10-15, *в*).

20. Находим количество воздуха, прогоняемое вентилятором, по (10-1)

$$V = \frac{\Sigma P_в}{c_в \Theta_в} = \frac{11\,940}{1\,100 \cdot 20} = 0,54\ м^3/сек,$$

где $\Sigma P_в = 11\,940$ *вт* — потери, отводимые воздухом;
$c_в = 1\,100$ *дж/град · м³* — удельная теплоемкость воздуха;
$\Theta_в = 20°$ С — допустимый подогрев воздуха.

Количество воздуха, прогоняемое между катушками возбуждения (см. п. 19),

$$V_I = \frac{2,46}{2,46 + 1} V =$$
$$= \frac{2,46}{3,46} \cdot 0,54 = 0,38\ м^3/сек;$$

количество воздуха, прогоняемое по аксиальным каналам якоря,

$$V_{II} = V - V_I = 0,54 - 0,38 = 0,16\ м^3/сек.$$

21. Наружный диаметр вентилятора

$$D_2 = (1,4 \div 1,5) D = (1,4 \div 1,5) \cdot 36,8 = 51,5 \div 55;$$

принимаем $D_2 = 52$ *см*.

22. Окружная скорость вентилятора

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n_н}{6\,000} = \frac{\pi \cdot 52 \cdot 1\,450}{6\,000} = 38,6\ м/сек.$$

23. Максимальный расход воздуха по (10-48)

$$V_{макс} = 2V = 2 \cdot 0,54 = 1,08\ м^3/сек.$$

24. Требуемый напор, развиваемый вентилятором при работе, по (10-2)

$$H = ZV^2 = 184 \cdot 0,54^2 = 53\ кГ/м^2.$$

25. Напор вентилятора при холостом ходе по рис. 10-15, кривая *1*:

$$H_0 = \frac{H}{0,9} = \frac{53}{0,9} = 59\ кГ/м^2.$$

26. Требуемая окружная скорость на внутренней кромке лопаток по (10-54) с учетом (10-37) и (10-38а)

$$u_1 = \sqrt{u_2^2 - \frac{H_0}{0,061}} =$$
$$= \sqrt{38,6^2 - \frac{59}{0,061}} = 25\ м/сек.$$

27. Внутренний диаметр вентиляторного колеса

$$D_1 = \frac{u_1}{u_2} D_2 = \frac{25}{38,6} \cdot 52 = 33,6\ см.$$

28. Поперечное сечение для выхода воздуха на внешней кромке вентилятора по (10-49) с учетом (10-39)

$$S_2 = \frac{V_{макс}}{0,35 u_2} = \frac{1,08}{0,35 \cdot 38,6} = 0,08\ м^2 = 800\ см^2$$

29. Ширина лопаток по (10-50)

$$b = \frac{S_2}{0,92 \pi D_2} = \frac{800}{0,92 \pi \cdot 52} = 5,3\ см.$$

30. Число лопаток вентилятора по (10-56)

$$N_л = (6 \div 10) \frac{D_2}{D_2 - D_1} =$$
$$= (6 \div 10) \frac{52}{52 - 33,6} = 17 \div 28;$$

принимаем $N_л = 23$.

31. Потребляемая мощность вентилятора при $\eta_э = 0,25$ по (10-57)

$$P_в = 9,81 \frac{VH}{\eta_э} = 9,81 \frac{0,54 \cdot 53}{0,25} = 70\ вт$$

л) Тепловой расчет

Тепловой расчет выполним по методу тепловых схем замещения (см. § 11-5). При относительно большом воздушном зазоре между якорем и полюсами их взаимным тепловым влиянием пренебрегаем.

Для определения среднего перегрева обмотки якоря при максимально допустимой

температуре $\vartheta_м = 120°$ С используем тепловую схему рис. 11-7, в. В этой схеме имеются два источника тепла: 1) обмотка якоря с потерями $P_{об} = P_{эа} + P_{доб} = 5\,220$ *вт* и 2) сердечник якоря с полными потерями в стали $P'_c = 2\,760$ *вт* (без поверхностных потерь в полюсных наконечниках).

Определим тепловые сопротивления схемы.

1. Тепловое сопротивление от стенки паза к обмотке по (11-67)

$$R_п = \frac{\delta_{из(п)}}{\lambda_{из} S_{из\,(п)}} = \frac{0{,}12}{0{,}0016 \cdot 6\,800} = 11 \cdot 10^{-3},$$

где $\delta_{из(п)} = 0{,}12$ *см* — толщина пазовой изоляции, включая одностороннюю толщину изоляции проводника (табл. 12-14);

$\lambda_{из} = 0{,}0016$ (табл. 11-3);

$\alpha_п = 0{,}05$ — коэффициент теплоотдачи от стенки паза к изоляции;

$$S_{из\,(п)} = Z\Pi_п l = 40 \cdot 6{,}4 \cdot 25{,}5 = 6\,800 \text{ см}^2 \text{ по (11-68)}.$$

2. Тепловое сопротивление от лобовых частей обмотки якоря к охлаждающему воздуху по (11-69)

$$R_{об} = \frac{\delta_{из(л)}}{\lambda_{из} S_л} + \frac{1}{\alpha_л S_л} = \frac{0{,}035}{0{,}0016 \cdot 9\,500} + \frac{1}{7{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 9500} = 17{,}1 \cdot 10^{-3},$$

где $\delta_{из(л)} = 0{,}035$ *см* — толщина изоляции лобовых частей обмотки якоря (табл. VI-3);

$$\alpha_л = 1{,}4 \cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}8\sqrt{v_a}\right) = 1{,}4 \cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}8\sqrt{25{,}7}\right) = 7{,}1 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град·м}^2 \text{ по (11-48)};$$

$$S_л = 2Z\Pi l_л = 2 \cdot 40 \cdot 3 \cdot 40 = 9\,500 \text{ см}^2 \text{ по (11-70б)};$$

$\Pi = 3$ *см* — часть периметра катушки обмотки якоря, открытая для охлаждающего воздуха;

$Z = 40$ — число пазов якоря;

$l_л = 40$ *см* — длина лобового соединения обмотки.

3. Тепловое сопротивление от стенок аксиальных вентиляционных каналов к охлаждающему воздуху по (11-57)

$$R_c = \frac{1}{\alpha_c S_c} = \frac{1}{1{,}84 \cdot 10^{-3} \cdot 5\,200} = 10{,}5 \cdot 10^{-3},$$

где $\alpha_c = 3{,}6 d_к^{-0{,}2} v_{кан}^{0{,}8} \cdot 10^{-4} = 3{,}6\,(0{,}02)^{-0{,}2}\,(14{,}5)^{0{,}8} \cdot 10^{-4} = 1{,}84 \cdot 10^{-3}$ по (11-46а);

$d_к = 2$ *см* — диаметр вентиляционного канала;

$$v_{кан} = \frac{V_{II}}{S_{10}} = \frac{0{,}16}{11 \cdot 10^{-3}} = 14{,}5 \text{ м/сек}$$

— скорость охлаждающего воздуха в вентиляционных каналах (см. вентиляционный расчет генератора);

$S_c = n_к \pi d_к l k_c = 35\pi \cdot 2 \cdot 25{,}5 \cdot 0{,}93 = 5\,200$ *см²*

— охлаждающая поверхность вентиляционных каналов по (11-81а).

4. Превышение температуры обмотки якоря над охлаждающим воздухом по (11-66а)

$$\Theta_{об} = \frac{\left[P_{об}\left(1 + \frac{R_п}{R_c}\right) + P_c\right] R_п}{\left(1 + \frac{R_п}{R_c}\right)\left(1 + \frac{R_п}{R_{об}}\right) - 1} = \frac{\left[5\,220\left(1 + \frac{11}{10{,}5}\right) + 2\,760\right] 11 \cdot 10^{-3}}{\left(1 + \frac{11}{10{,}5}\right)\left(1 + \frac{11}{17{,}1}\right) - 1} = 63° \text{ С}.$$

5. Средняя температура нагрева обмотки якоря по (11-59)

$$\vartheta_{об} = \Theta_{об} + \frac{\Theta_в}{2} + \vartheta_0 = 63 + \frac{20}{2} + 40 = 113° \text{ С},$$

где $\Theta_в = 20°$С — подогрев охлаждающего воздуха;

$\vartheta_0 = 40°$ С — температура окружающего воздуха по ГОСТ 183-66.

6. Превышение температуры сердечника якоря по (11-66б)

$$\Theta_c = \frac{P_c R_п + \Theta_{об}}{1 + \frac{R_п}{R_c}} = \frac{2\,760 \cdot 11 \cdot 10^{-3} + 63}{1 + \frac{11}{10{,}5}} = 46° \text{ С}.$$

7. Тепловое сопротивление от шунтовой обмотки возбуждения к охлаждающему воздуху по (11-69)

$$R_{л(ш)} = \frac{\delta_{из(ш)}}{\lambda_{из} S_{л(ш)}} + \frac{1}{\alpha_{л(ш)} S_{л(ш)}} = \frac{0{,}075}{0{,}0016 \cdot 2\,340} + \frac{1}{7{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,340} = 80 \cdot 10^{-3},$$

где $\delta_{из(ш)} = 0{,}075$ *см* — толщина изоляции катушек возбуждения;

$\lambda_{из} = 0{,}0016$ — удельная теплопроводность изоляции класса В (табл. 11-3);

$$\alpha_{л(ш)} = 3{,}6\, d_э^{-0{,}2}\, v_I^{0{,}8} \cdot 10^{-4} = 3{,}6\,(0{,}02)^{-0{,}2} 15{,}6^{0{,}8} \cdot 10^{-4} = 7{,}1 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град·см}^2 \text{ по (11-46а)};$$

$d_э = 0{,}02$ *м* — эквивалентный диаметр поперечного сечения площади окна между катушками возбуждения (см. п. и 4);

$v_l = V_l / S_4 = 0{,}38/24 \cdot 10^{-3} = 15{,}9$ *м/сек* — скорость охлаждающего воздуха между катушками возбуждения (см. вентиляционный расчет генератора);

$S_{л(ш)} = 2ph_к(2l_m + b_m + \pi b_к) \approx 4 \times \times 8(2 \cdot 25{,}5 + 13 + \pi \cdot 3) = 2\,340$ *см²* — площадь охлаждения шунтовой обмотки;

$h_к = 8$ *см*; $b_к = 3$ *см* — общая высота и ширина катушки возбуждения (рис. 12-22).

8. Превышение температуры шунтовой обмотки

$$\Theta_ш = P_ш\ R_{л(ш)} = 640 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 52°\ С,$$

где $P_ш = 640$ *вт* — потери в обмотке возбуждения.

9. Превышение температуры сериесной обмотки возбуждения по (11-56)

$$\Theta_с = \frac{P_{э.с}}{\alpha_с S_{(с)}} = \frac{280}{7{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,300} \approx 30°\ С,$$

где $\alpha_с \approx \alpha_{л(ш)} = 7{,}1 \cdot 10^{-3}$;

$S_с = 0{,}25 \cdot 2pw_с \Pi_с l_{с.ср} = 0{,}25 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 86{,}5 = 1\,300$ *см²* — поверхность охлаждения обмотки, принято, что активная поверхность охлаждения голых стержней обмотки составляет около 25% полной поверхности боковых сторон каждого стержня;

$\Pi_с = 2b_{ст} = 2 \cdot 2{,}5 = 5$ *см* — периметр поперечного сечения стержня;

$b_{ст} = 2{,}5$ *см* — ширина боковой стороны стержня;

$l_{с.ср}$ — средняя длина витка;

$$P_{э.с} = I_{ан}^2\ r_{с120} = 657^2 \cdot 0{,}00065 = 280\ вт.$$

10. Превышение температуры обмотки добавочных полюсов по (11-56)

$$\Theta_д = \frac{P_{э.д}}{\alpha_д S_{(д)}} = \frac{1\,490}{7{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 6\,550} \approx 32°\ С,$$

где $\alpha_д \approx \alpha_{л(ш)} = 7{,}1 \cdot 10^{-3}$;

$S_д \approx 0{,}25 \cdot 2pw_д \Pi_д l_{д.ср} = 0{,}25 \cdot 4 \cdot 19 \cdot 5 \cdot 69 = 6\,550$ *см²* — поверхность охлаждения;

$$P_{э.д} = I_{ан}^2\ r_{д120} = 657^2 \cdot 0{,}00345 = 1\,490\ вт.$$

Приняты условия охлаждения, аналогичные условиям охлаждения сериесной обмотки;

$l_{д.ср}$ — средняя длина витка обмотки добавочных полюсов.

11. Превышение температуры поверхности коллектора по (11-91)

$$\Theta_к = \frac{P_к}{\alpha_к S_к} = \frac{2\,034}{26{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,450} = 52°\ С,$$

где $P_к = P_{э.щ} + P_{тр.щ} = 1\,314 + 720 = 2\,034$ *вт* — потери на коллекторе;

$\alpha_к = 5 \cdot 10^{-3}(1 + \sqrt{v_к}) = 5 \cdot 10^{-3}(1 + \sqrt{19}) = 26{,}7 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора по (11-49);

$v_к = 19$ *м/сек* — окружная скорость коллектора;

$S_к = \pi D_к L_к = \pi \cdot 25 \cdot 18{,}5 = 1\,450$ *см²* — наружная поверхность охлаждения коллектора.

Из теплового расчета следует, что наиболее нагретой является обмотка якоря ($\Theta_{об} = 63°$ С).

При предельном превышении температуры изоляции класса В, равном 80° С, возможно увеличение тока длительной нагрузки до значения, приблизительно равного

$$I_{макс} \approx I_{ан} \sqrt{\frac{80}{\Theta_{об}}} = 657 \sqrt{\frac{80}{63}} = 730\ а.$$

Соответственно номинальная мощность генератора может быть приблизительно принята

$$P_{макс} \approx U_н\ I_{макс} \cdot 10^{-3} = 230 \cdot 730 \cdot 10^{-3} \approx 168\ квт.$$

Б. Расчет двигателя (параллельного возбуждения) 14 *квт*, 220 *в*, 1 000 *об/мин*

Двигатель проектируется с регулированием скорости вращения 2,25 : 1 путем изменения магнитного потока. Исполнение машины защищенное, система охлаждения аксиальная вытяжная с собственным вентилятором на валу. Изоляция обмоток класса F. Машина предназначена для режима продолжительной работы и должна удовлетворять ГОСТ 183-66.

а) Выбор главных размеров

1) Определяем отношение

$$P_н/n_н = 14 \cdot 10^3/1\,000 = 14\ вт \cdot мин/об,$$

где $P_н = 14 \cdot 10^3$ *вт*; $n_н = 1\,000$ *об/мин*.

2. По кривой рис. 12-4 находим диаметр якоря

$$D = 22\ см.$$

Принимаем ближайший нормализованный по приложению I, табл. I-1

$$D = 21\ см.$$

3. Число полюсов выбираем из рис. 12-7

$$2p = 4.$$

4. Принимаем предварительные значения электромагнитных нагрузок:

по кривой рис. 12-2 для $D = 21$ *см*

$$B_\delta = 8\,000\ гс;$$

по кривой рис. 12 2 $A = 250$ *а/см*.

5. Расчетная мощность якоря по (12-3)

$$P' = k_д P_н / \eta_н = 0{,}91 \cdot 14/0{,}82 = 15{,}5\ квт;$$

где коэффициент $k_д = 0{,}91$ (табл. 12-5); предварительное значение к.п.д. двигателя $\eta_н = 0{,}82$ из табл. 12-4.

Таблица 12-6Б

Варианты расчета главных размеров

№ варианта	D, см	B_δ, гс	A, а/см	τ, см	l_δ, см	λ	$\lambda' = \lambda/\gamma'$	$\lambda'' = \gamma''\lambda$
1	21,0	8 000	250	16,5	16,5	1	0,79	1,36
2	19,5	7 850	230	15,2	21	1,38	1,08	1,88
3	24,5	8 450	275	19,2	10,4	0,735	0,58	1

6. Расчетная длина якоря по (12-1)

$$l_\delta = \frac{6{,}1\, P' \cdot 10^{11}}{\alpha_\delta\, B_\delta\, AD^2\, n_н} = \frac{6{,}1 \cdot 15{,}5 \cdot 10^{11}}{0{,}65 \cdot 8\,000 \cdot 250 \cdot 21^2 \cdot 1\,000} = 16{,}5 \text{ см}.$$

7. Полюсное деление якоря

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 21}{4} = 16{,}5 \text{ см}.$$

8. Отношение λ по (12-5)

$$\lambda = l_\delta / \tau = 16{,}5/16{,}5 = 1.$$

9. Окружная скорость якоря

$$v_a = \frac{\pi D n_н}{6\,000} = \frac{21 \cdot 1\,000}{6\,000} = 11 \text{ м/сек}.$$

10. Полная длина сердечника якоря по (12-11) при однопакетном исполнении

$$l_1 \approx l_\delta = l = 16{,}5 \text{ см}.$$

11. Составим таблицу вариантов главных размеров для нормализованных диаметров якоря, ближайших к выбранному. Примем мощность смежных машин по шкале табл. 12-1: $P_н' = 11$ *квт* и $P_н'' = 19$ *квт*, что соответствует коэффициентам нарастания мощностей $\gamma' = P_н/P_н' = 14/11 = 1{,}27$ и $\gamma'' = P_н''/P_н = 19/14 = 1{,}36$.

Сопоставление для различных вариантов соотношений λ, λ' и λ'' показывает, что первый вариант обеспечивает их наиболее оптимальные пределы (см. 12-5а) для смежных мощностей (0,79—1,36). Принимаем первый вариант.

б) Выбор обмотки якоря. Число коллекторных пластин. Число пазов. Размеры паза

1. Число пазов якоря

$$Z = 2p\,(Z/2p) = 4\,(7 \div 12) = 28 \div 48,$$

где $(Z/2p) = 7 \div 12$ (табл. 12-8); принимаем $Z = 35$.

2. Зубцовое деление якоря

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 21.0}{35} = 1{,}88 \text{ см}.$$

3. Ток якоря машины (предварительно)

$$I_{ан} = \frac{(1 - k_в)\, P_н}{\eta_н\, U_н} = \frac{0{,}975 \cdot 14 \cdot 10^3}{0{,}82 \cdot 220} = 75{,}5 \text{ а},$$

где $k_в = 0{,}025$— относительное значение тока возбуждения (табл. 12-5).

4. Число параллельных ветвей из условия (12-15)

$$I_{ан}/2a \leqslant 250 \text{ а};$$

принимаем $2a = 2$, т. е. простую волновую обмотку.

5. Число проводников в пазу по (12-24)

$$N/Z = \frac{At_1 \cdot 2a}{I_{ан}} = \frac{250 \cdot 1{,}88 \cdot 2}{75{,}5} = 12{,}5;$$

принимаем $N/Z = 12$.

В связи с изменением значения N/Z предварительные значения электромагнитных нагрузок составят:

$$B_\delta = 8\,000 \cdot \frac{12{,}5}{12} = 8\,300 \text{ гс};$$

$$A = 250 \cdot \frac{12}{12{,}5} = 240 \text{ а/см}.$$

6. Полное число проводников обмотки якоря

$$N = (N/Z)\, Z = 12 \cdot 35 = 420.$$

7. Число коллекторных пластин K для различных значений $u_п = K/Z$:

Таблица 12-9Б

Выбор варианта

№ варианта	$u_п$	$K = u_п Z$	$w_с = N/2K$	$U_{к.ср.}$, в
1	1	35	6	28,3
2	2	70	3	14,2
3	3	105	2	8,4

Принимаем третий вариант, обеспечивающий обмотку с целым числом витков в секции $w_с = 2$ без мертвых проводов и с допустимым значением $U_{к.ср} = 8{,}4$ в;

$$K = 105$$

8. Шаг обмотки якоря по коллектору

$$y_к = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{105 - 1}{2} = 52.$$

9. Зубцовый шаг обмотки

$$y_z = Z/2p = 35/4 = 8\frac{3}{4};$$

принимаем $y_z = 9$ (из 1-го в 10-й паз).

10. Частичные шаги обмотки (см. гл. 3):

$$y_1 = u_п y_z = 3 \cdot 9 = 27;$$

$$y_2 = y - y_1 = 52 - 27 = 25,$$

где $y = y_к = 52$.

11. Допустимая тепловая нагрузка якоря в (12-28) выбирается по кривой рис. 12-3, изоляция паза и обмоточного провода принята класса F:

$$(A\Delta)_F = (A\Delta)_A \frac{\Theta_F}{\Theta_A} \frac{\rho_A}{\rho_F} =$$

$$= 1\,300 \cdot \frac{100}{60} \cdot \frac{100 + 235}{140 + 235} = 1\,930,$$

где $(A\Delta)_A = 1300$ — тепловая нагрузка при изоляции класса А по кривой рис 12-3;

$\vartheta_F - \vartheta_0 = \Theta_F = 100°$ С — допускаемое превышение температуры обмоток с изоляцией класса F;

$\vartheta_A - \vartheta_0 = \Theta_A = 60°$ С — то же с изоляцией класса А;

ρ_A, ρ_F — удельное электрическое сопротивление меди при допускаемых температурах 100 и 140° С для изоляции классов А и F;

$\vartheta_0 = 40°$ С — стандартная температура охлаждающего воздуха.

12. Предварительное значение плотности тока обмотки якоря

$$\Delta_a = \frac{(A\Delta)_F}{A} = \frac{1\,930}{240} \approx 8 \text{ а/мм}^2.$$

13) Предварительное сечение проводника якоря

$$s_a = I_{ан}/2a\,\Delta_a = 75{,}5/2 \cdot 8 = 4{,}7 \text{ мм}^2.$$

По табл. VI-3 и VI-4 выбираем медный провод прямоугольного сечения с изоляцией ПСД: 1,08×4,4/1,35×4,67 *мм*.

Укладка обмотки в пазу показана на рис. 12-26 (см. далее п. 20).

14. Предварительное значение э.д.с. якоря

$$E_{ан} = \frac{P'}{I_{ан}} = \frac{15{,}5 \cdot 10^3}{75{,}5} \approx 205 \text{ в}.$$

15. Магнитный поток полюса из (12-14)

$$\Phi = \frac{60\,E_{ан}\,a \cdot 10^8}{p n_н N} =$$

$$= \frac{60 \cdot 205 \cdot 1 \cdot 10^8}{2 \cdot 1\,000 \cdot 420} = 1{,}46 \cdot 10^6 \text{ мкс}.$$

16. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta н} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta\,\tau l_\delta} = \frac{1{,}46 \cdot 10^6}{0{,}65 \cdot 16{,}5 \cdot 16{,}5} = 8\,250 \text{ гс}.$$

17. Минимальная ширина зубца якоря с учетом табл. 12-3

$$b_{z мин} = b_{z3} = \frac{B_{\delta н}\; t_1\; l_\delta}{k_c\; l B_{z\,макс}} =$$

$$= \frac{8\,250 \cdot 1{,}88 \cdot 16{,}5}{0{,}93 \cdot 16{,}5 \cdot 23\,000} = 0{,}72 \text{ см}.$$

18. Предварительная ширина паза (пазы выбираем открытые)

$$b_п = t_3 - b_{z3} = 1{,}4 - 0{,}72 = 0{,}68 \text{ см},$$

где

$$t_3 = \frac{\pi (D - 2h_z)}{Z} = \frac{\pi (21 - 2 \cdot 2{,}7)}{35} = 1{,}4 \text{ см}$$

высота зубца h_z по рис. 12-8 $h_z = 2{,}7$ *см*.

19. Укладываем проводники в два слоя по $u_п = 3$ в каждом слое согласно табл. VI-4; принимаем суммарный размер изоляции по ширине паза (см. п. 622): $\Delta_{из} = 2{,}55$ *мм*. Тогда предварительная ширина изолированного проводника обмотки якоря

$$b_{из} = \frac{b_п - \Delta_{из}}{u_п} = \frac{6{,}8 - 2{,}6}{3} = 1{,}43 \text{ мм}.$$

Выбираем провод ПСД

$$\frac{\text{голый } 1{,}08 \times 4{,}4 \text{ мм}}{\text{изолированный } 1{,}35 \times 4{,}67}$$

с поперечным сечением $s_a = 4{,}54$ *мм²*.

20. Плотность тока обмотки якоря

$$\Delta_a = \frac{I_{ан}}{2as_a} = \frac{75{,}5}{2 \cdot 4{,}54} = 8{,}3 \text{ а/мм}^2.$$

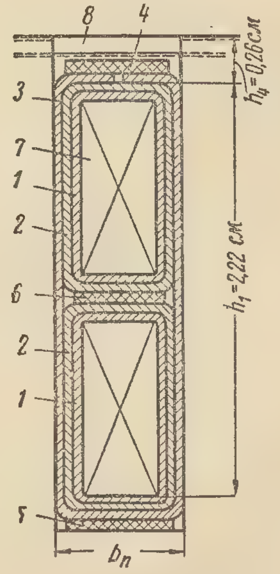


Рис. 12-26. Паз двигателя.

Таблица 12-16

Спецификация паза

№ позиции на рис. 12-26	Наименование	Число слоев	По ширине паза, *мм*	По высоте паза, *мм*
2	Стекломикалента 0,17 *мм*	2 слоя вполнахлеста	1,36	1,36
3	Лента стеклянная 0,2 *мм*	2	0,4	0,4
	Разбухание от пропитки	—	0,24	0,24
	Толщина изоляции одной катушки	—	2,0	2,0
4	Стеклолакоткань 0,15 *мм*	—	2×0,15=0,3	3×0,15=0,45
5	Стеклотекстолит 0,5 *мм*	1	—	0,5
6	То же 0,5 *мм*	1	—	0,5
7	То же 0,5 *мм*	1	—	0,5
	Допуск на укладку	—	0,3	0,55
	Всего изоляции на паз	—	2,6	6,5
1	Провод изолированный 1,35×4,67 *мм*	—	3×1,35=4,05	4×4,67=18,68
8	Бандаж	—	—	1,5
	Всего	—	6,65	26,13

21. Спецификация паза с обмоткой приведена в табл. 12-16, а поперечный разрез паза с нумерацией отдельных элементов обмотки показан на рис. 12-26.

Принимаем размеры паза в свету

$$b_п \times h_п = 6,9 \times 27\ мм^2,$$

где

$$h_п = h_z = 27\ мм.$$

22. Предварительная высота ярма якоря

$$h_a = \frac{\Phi}{2k_c l B_a} = \frac{1,46 \cdot 10^8}{2 \cdot 0,93 \cdot 16,5 \cdot 13\,000} = 3,66\ см,$$

где B_a — предварительное значение индукции по табл. 12-3; $B_a = 13\,000\ гс$;

$k_c = 0,93$ — коэффициент заполнения сталью пакета сердечника якоря (табл. 2-4); принята сталь Э11 толщиной 0,5 *мм*.

23. Принимаем в сердечнике якоря один ряд аксиальных вентиляционных каналов:
число каналов $n_к = 14$;
диаметр каналов $d_к = 1,7\ см$.

24. Расчетная высота ярма якоря по (12-31)

$$h_a = \frac{D - D_a}{2} - h_z - {}^2/_3\, d_к = \frac{21 - 6}{2} - 2,7 - {}^2/_3 \cdot 1,7 = 3,7\ см,$$

где $D_a = d_в = 6\ см$ — диаметр вала якоря.

25. Расчетное сечение ярма якоря

$$S_a = k_c l h_a = 0,93 \cdot 16,5 \cdot 3,7 = 57\ см^2.$$

в) Размеры коллектора. Щетки

1. Диаметр коллектора

$$D_к < D, \text{ т. е. } D_к < 21\ см;$$

принимаем нормализованный диаметр коллектора $D_к = 15\ см$.

2. Коллекторное деление

$$t_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 15}{105} = 0,45\ см\ (4,5\ мм).$$

3. Щетки выбираем по табл. 2-8; марка щеток ЭГ-4;
номинальная плотность тока $\Delta_щ = 12\ а/см^2$;
переходное падение напряжения

$$2\Delta U_щ = 2\ в;$$

удельное нажатие $p_щ = 0,2 \div 0,15\ кГ/см^2$;
коэффициент трения $k_{тр} = 0,25$.

4. Размеры щеток по прилож. V.

$$b_щ \times l_щ = 12,5 \times 25\ мм\ (1,25 \times 2,5\ см).$$

5. Щеточное перекрытие

$$\beta_щ = b_щ / t_к = 12,5/4,5 = 2,78.$$

6. Число щеток на болт

$$N'_щ = \frac{I_{ан}}{p \Delta_щ b_щ l_щ} = \frac{75,5}{2 \cdot 12 \cdot 1,25 \cdot 2,5} = 1$$

Для надежности скользящего контакта берем $N'_щ = 2$.

7. Общее число щеток

$$N_щ = 2pN'_щ = 4 \cdot 2 = 8.$$

8. Плотность тока в щеточном контакте

$$\Delta_щ = \frac{2I_{ан}}{N_щ b_щ l_щ} = \frac{2 \cdot 75,5}{8 \cdot 1,25 \cdot 2,5} \approx 6\ а/см^2.$$

9. Полная длина коллектора с учетом шахматного расположения щеток (гл. 9)

$$L_к = 12{,}5\ см.$$

10. Окружная скорость коллектора

$$v_к = \frac{\pi D_к n_н}{6\,000} = \frac{\pi \cdot 15 \cdot 1\,000}{6\,000} = 7{,}8\ м/сек.$$

г) Воздушный зазор. Главные полосы. Ярмо статора

1. Расчетное значение полюсной дуги

$$b_\delta = \alpha_\delta\, \tau = 0{,}65 \cdot 16{,}5 = 10{,}7\ см.$$

2. Воздушный зазор определяем по (12-38) при открытых пазах и проволочных бандажах; имея в виду применение стабилизирующей обмотки, влияние регулирования скорости вращения на выбор δ по (12-40) не учитываем

$$\delta \geqslant \varkappa \frac{b_\delta A}{B_{\delta п}} = (0{,}37 \div 0{,}42) \cdot \frac{10{,}7 \cdot 240}{8\,250} = 0{,}116 \div 0{,}131\ см.$$

принимаем $\delta = 0{,}15$ *см.*

3. Аксиальная длина полюса

$$l_p = l_m = l_1 = 16{,}5\ см.$$

4. Ширина полюсного сердечника

$$b_m = \frac{\sigma \Phi}{l_m B_m} = \frac{1{,}15 \cdot 1{,}46 \cdot 10^6}{16{,}5 \cdot 17\,000} = 6{,}0\ см,$$

где $\sigma = 1{,}15$ — предварительное значение коэффициента магнитного рассеяния полюсов;

$B_m = 17\,000$ *гс* для стали Э330 (табл. 12-3); принимаем $b_m = 6{,}2$ *см.*

5. Высота полюса по (рис. 12-10)

$$h_m = 7 \div 9\ см.$$

В результате дальнейших расчетов обмоток возбуждения принято

$$h_m = 8{,}35\ см.$$

6. Сечение полюсного сердечника

$$S_m = k_c\, l_m\, b_m = 0{,}95 \cdot 16{,}5 \cdot 6{,}2 = 97\ см^2.$$

7. Аксиальная длина ярма станины

$$l_c = (1{,}5 \div 2{,}0)\, l_m = (1{,}5 \div 2{,}0)\, 16{,}5 = 25 \div 33\ см;$$

принимаем $l_c = 28{,}5$ *см.*

8. Высота ярма станины

$$h_c = \frac{\sigma \Phi}{2 l_c B_c} = \frac{1{,}15 \cdot 1{,}46 \cdot 10^6}{2 \cdot 28{,}5\,(11\,000 \div 13\,000)} = 2{,}67 \div 2{,}26\ см,$$

где $B_c = 11\,000 \div 13\,000$ *гс* (по табл. 12-3).

Материал ярма станины — стальное литье. Принимаем $h_c = 2{,}4$ *см.*

9. Сечение станины

$$S_c = h_c\, l_c = 2{,}4 \cdot 28{,}5 = 68{,}5\ см^2.$$

10. Наружный диаметр станины

$$D_c = D + 2(\delta + h_m + h_c) = 21 + 2(0{,}15 + 8{,}35 + 2{,}4) = 42{,}8\ см.$$

д) Расчет магнитной цепи. Характеристика холостого хода

Расчет производится по формулам, использованным в предыдущем примере.

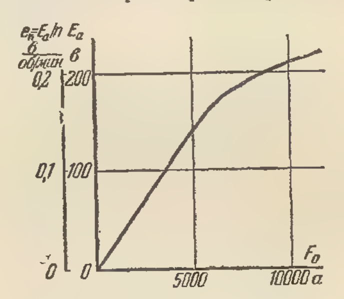


Рис. 12-27. Характеристики холостого хода двигателя.

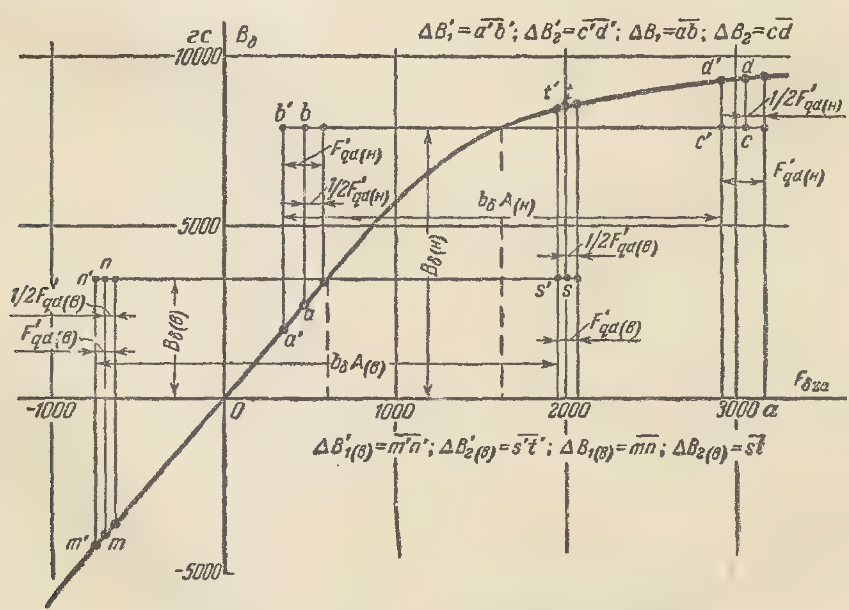


Рис. 12-28. Переходная характеристика двигателя.

Таблица 12-17

Данные расчета магнитной цепи двигателя

Электродвижущая сила якоря E_a, в	70	100	160	200	220	195
$\Phi = 7\,150 E_a$, мкс	$0{,}5 \cdot 10^6$	$0{,}715 \cdot 10^6$	$1{,}15 \cdot 10^6$	$1{,}43 \cdot 10^6$	$1{,}57 \cdot 10^6$	$1{,}40 \cdot 10^6$
$B_\delta = 40 E_a$, гс	2 830	4 040	6 450	8 080	8 890	7 900
$F_\delta = 13{,}2 E_a$, а	925	1 320	2 110	2 640	2 880	2 580
$B_{z_{1/3}} = 93{,}5 E_a$, гс	6 540	9 350	15 000	18 700	20 600	18 200
$H_{z_{1/3}}$, а/см	2,4	4,3	25	150	320	115
$F_z = 5{,}4 H_{z_{1/3}}$, а	13	23,2	135	810	1 730	620
$B_a = 62{,}8\, E_a$, гс	4 400	6 280	10 000	12 560	13 800	12 250
H_a, а/см	1,5	2,26	5,0	9,9	14,8	9,0
$F_a = 6{,}7 H_a$, а	10	15	33	66,5	100	60
$F_{\delta za} = F_\delta + F_z + F_a$, а	948	1 355	2 280	3 520	4 640	3 260
$\Phi_\sigma = 37 F_{\delta za}$, мкс	35 000	50 000	86 000	130 000	170 000	120 000
$\sigma = 1 + \Phi_\sigma / \Phi_m$	1,07	1,07	1,075	1,09	1,1	1,085
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, мкс	$0{,}535 \cdot 10^6$	$0{,}765 \cdot 10^6$	$1{,}234 \cdot 10^6$	$1{,}56 \cdot 10^6$	$1{,}74 \cdot 10^6$	$1{,}52 \cdot 10^6$
$B_m = \Phi_m / 97$, гс	5 500	7 900	12 800	16 100	18 000	15 700
H_m, а/см	0,75	1,3	2,7	5,44	15,4	4,8
$F_m = 16{,}7 H_m$, а	13	22	45	90	240	80
$F_{\delta m} = 0{,}024 B_m$, а	132	190	307	385	435	375
$B_c = \Phi_m / 137$, гс	3 900	5 600	9 000	11 400	13 100	11 100
H_c, а/см	3,12	4,52	7,8	11,7	16,3	11,1
$F_c = 31{,}6 H_c$, а	100	142	282	440	610	415
ΣF, а	1 195	1 710	2 900	4 435	5 930	4 130
$F_0 = p \Sigma F = 2 \Sigma F$, а	2 400	3 420	5 800	8 870	11 860	8 160
$1/2 F_{\delta za}$, а	474	677	1 125	1 760	2 320	1 630
$e_n = E_a / 1\,000$ в·мин/об	0,07	0,1	0,16	0,2	0,225	0,195
$I_ш = F_0 / 4\,400$ а	0,55	0,78	1,31	2,01	2,7	1,85

По результатам расчета магнитной цепи составлена табл. 12-17 и по ее данным на рис. 12-27 построены характеристики холостого хода $E_a = f(F_0)$ и $e_n = \frac{E_a}{n} = f(F_0)$, а на рис. 12-28 — переходная характеристика $B_\delta = f(F_{\delta za})$.

е) Расчет н.с. возбуждения при нагрузке. Расчет обмоток возбуждения

При нагрузке двигателя н.с. всех обмоток возбуждения должна, во-первых, создать магнитное поле, необходимое для индуктирования э.д.с. якоря, и, во-вторых, скомпенсировать размагничивающее действие поперечной н.с. якоря. Продольная реакция якоря отсутствует, так как машина снабжена добавочными полюсами и щетки располагаются на геометрической нейтрали.

1) Определим сопротивление обмотки якоря (класс изоляции обмотки F): при 20° С

$$r_{a20} = \frac{N l_{acp}}{5\,600\,(2a)^2\, s_a} =$$

$$= \frac{420 \cdot 3{,}95}{5\,600 \cdot 2^2 \cdot 4{,}54} = 0{,}163 \text{ ом};$$

при 115° С

$$r_{a115} = k_\vartheta \; r_{a20} = 1{,}37 \cdot 0{,}163 = 0{,}224 \text{ ом};$$

при 140° С

$$r_{a140} = k_\vartheta \; r_{a20} = 1{,}47 \cdot 0{,}163 = 0{,}24 \text{ ом},$$

где

$$l_{a\text{ср}} = l_1 + l_\text{л} = 16{,}5 + 23 = 39{,}5 \text{ см};$$

$$l_\text{л} \approx 1{,}4\,\tau = 1{,}4 \cdot 16{,}5 = 23 \text{ см}.$$

2. Электродвижущая сила якоря при номинальном режиме работы

$$E_{a\text{н}} = U_\text{н} - I_{a\text{н}} (r_{a115} + r_{\text{д}115} + r_{\text{с}115}) - - 2\Delta U_\text{щ} = 220 - 75{,}5\,(0{,}224 + 0{,}07 + + 0{,}0048) - 2 \approx 195 \text{ в},$$

где $r_{\text{д}115} = 0{,}07$ *ом* — сопротивление обмотки добавочных полюсов (см. п. ж21);

$r_{\text{с}115} = 0{,}0047$ *ом* — сопротивление стабилизирующей последовательной обмотки (см. п. е19).

3. Намагничивающая сила возбуждения, необходимая для индуктирования э.д.с., приведена в табл. 12-17 (при номинальном режиме)

$$F_E = 8\,160 \text{ а}.$$

4. Размагничивающая реакция якоря от действия поперечной н.с. обмотки якоря при $I_{a\text{н}} = 75{,}5$ *а* определяется по (6-90) с учетом § 6-8 с помощью переходной характеристики (рис. 12-28)

$$F''_{qd} \approx \frac{1}{6} \, \frac{\Delta B'_1 - \Delta B'_2}{\Delta B'_1 + \Delta B'_2} \, b_\delta \, A =$$

$$= \frac{1}{6} \cdot \frac{5\,950 - 1\,350}{5\,950 + 1\,350} \cdot 10{,}7 \cdot 240 = 270 \text{ а};$$

значения $\Delta B'_1 = 5\,950$ *гс*, $\Delta B'_2 = 1\,350$ *гс* получены при $B_{\delta\text{н}} = 7\,900$ *гс*. При смещении криволинейной трапеции с основанием $b_\delta \, A = 10{,}7 \cdot 240$ на $^1/_2 F'_{qd} = 135$ *а* (рис. 12-28) определяется $F_{qd\text{н}}$ с поправкой (см. § 6-8)

$$F_{qd\text{н}} = \frac{1}{6} \, \frac{\Delta B'_1 - \Delta B'_2}{\Delta B_1 + \Delta B_2} \, b_\delta \, A =$$

$$= \frac{1}{6} \cdot \frac{5\,950 - 1\,350}{5\,150 + 1\,450} \cdot 10{,}7 \cdot 240 = 300 \text{ а},$$

где $\Delta B_1 = 5\,150$ *гс*; $\Delta B_2 = 1\,450$ *гс* (рис. 12-28).

5. Так как двигатель должен обеспечить устойчивую работу при повышении скорости до $2{,}25 n_{\text{н(н)}}$ путем уменьшения тока возбуждения шунтовой обмотки, применим стабилизирующую последовательную обмотку. Примем при холостом ходе $n_{0(\text{н})} = (1{,}10 \div 1{,}15)\, n_{\text{н(н)}}$, где $n_{\text{н(н)}} = 1\,000$ *об/мин*.

6. Определим при холостом ходе двигателя н.с. шунтовой обмотки для принятой скорости $n_{0(\text{н})} = 1\,100 \div 1\,150$ *об/мин*; практически при холостом ходе $E_{a0} \approx U_\text{н} = 220$ *в*; вычисляем значения

$$e_n = E_a/n = \frac{220}{1\,100 \div 1\,150} = 0{,}200 \div 0{,}191.$$

По характеристике $e_n = E_a/n = f(F_0)$ на рис. 12-28 определяем искомую н.с. шунтовой обмотки

$$F_{\text{ш.о}} = 8\,100 \div 8\,870 \text{ а}.$$

7. Находим по (12-87) н.с. стабилизирующей обмотки при номинальном режиме работы и неизменном значении н.с. шунтовой обмотки $F_{\text{ш.о}}$

$$F_{\text{с.о}} = F_E + F_{\text{р.я}} - F_{\text{ш.о}} =$$

$$= 8\,160 + 1\,200 - (8\,870 \div 8\,100) =$$

$$= 490 \div 1\,260 \text{ а},$$

где $F_{\text{р.я}}$ — н.с. реакции якоря,

$$F_{\text{р.я}} = 2pF_{qd\text{н}} = 4 \cdot 300 = 1\,200 \text{ а}.$$

8. Число витков стабилизирующей обмотки на один полюс

$$w_{\text{с.о}} = \frac{F_{\text{с.о}}}{2p\, I_{a\text{н}}} = \frac{490 \div 1\,260}{4 \cdot 75{,}5} = 1{,}60 \div 2{,}1,$$

принимаем $w_{\text{с.о}} = 2$ витка при $a_{\text{с.о}} = 1$.

9. Намагничивающая сила шунтовой обмотки при номинальном режиме работы

$$F_{\text{ш.н}} = F_E + F_{\text{р.я}} - F_{\text{с.о}} =$$

$$= 8\,160 + 1\,200 - 602 = 8\,760 \text{ а},$$

где $F_{\text{с.о}} = 2pw_{\text{с.о}} I_{a\text{н}} = 4 \cdot 2 \cdot 75{,}5 = 602$ *а*.

10. Расчетное значение н.с. шунтовой обмотки

$$F_\text{макс} = (1{,}1 \div 1{,}05)\, F_{\text{ш.н}} =$$

$$= (1{,}1 \div 1{,}05)\, 8\,760 = 9\,650 \div 9\,200 \text{ а}.$$

11. Сечение проводника шунтовой обмотки при $\vartheta = 140°$ С по (12-99)

$$s_\text{ш} = \frac{F_\text{макс}\, l_{\text{ш.ср}}}{3\,800\, U_\text{н}} = (9\,650 \div 9\,200)\, \frac{58{,}0}{3\,800 \cdot 220} =$$

$$= 0{,}67 \div 0{,}64 \text{ мм}^2,$$

где $l_{\text{ш.ср}}$ — средняя длина витка шунтовой обмотки (12-98)

$$l_{\text{ш.ср}} = 2\,(l_m + b_m + 4\Delta_\text{из}) + \pi b_\text{к} =$$

$$= 2\,(16{,}5 + 6{,}2) + 4 \cdot 0{,}2 + \pi \cdot 3{,}5 = 58{,}0 \text{ см};$$

$b_\text{к} = 3{,}5$ *см* — ширина катушки возбуждения;

$\Delta_\text{из} = 0{,}2$ *см* — толщина изоляции сердечника полюса.

Выбираем по табл. IV-1 и IV-4 медный провод с изоляцией ПСД:

$$\text{диаметр провода } \frac{\text{голый}}{\text{изолированный}} = \frac{0{,}93 \text{ мм}}{1{,}11 \text{ мм}};$$

сечение провода $s_\text{ш} = 0{,}679$ *мм²*, что соответствует $F_\text{макс} = 9\,800$ *а*.

12. Принимая максимальную плотность тока обмоток возбуждения по табл. (12-12) $\Delta_\text{ш} = 3 \div 4$ *а/мм²*, находим пределы максимального тока возбуждения $I_{\text{ш.макс}} = \Delta_\text{ш} s_\text{ш} = 2{,}05 \div 2{,}70$ *а*.

13. Число витков на полюс шунтовой обмотки

$$w_ш = \frac{F_{макс}}{2p\, I_{ш\cdot макс}} = \frac{9\,800}{2\,(2{,}05 \div 2{,}70)} = $$

$$= 1\,200 \div 900;$$

принимаем $w_ш = 1\,100$ витков на полюс.

14. Сопротивление шунтовой обмотки: при 20° C

$$r_{ш20} = \frac{2pw_ш\, l_{шар}}{5\,600\, s_ш} = \frac{4 \cdot 1\,100 \cdot 58{,}0}{5\,600 \cdot 0{,}679} = 67{,}0 \ ом;$$

при 115° C

$$r_{ш115} = k_\vartheta\, r_{ш20} = 1{,}38 \cdot 67{,}0 = 92{,}5 \ ом;$$

при 140° C

$$r_{ш140} = 1{,}47 \cdot 67{,}0 = 98{,}5 \ ом.$$

15. Максимальный ток шунтовой обмотки

$$I_{ш\cdot макс} = \frac{U_н}{r_{ш140}} = \frac{220}{98{,}5} = 2{,}24 \ а.$$

16. Максимальная н.с. шунтовой обмотки

$$F_{макс} = I_{ш\cdot макс} \cdot 2pw_ш = $$

$$= 2{,}24 \cdot 4 \cdot 1\,100 = 9\,800 \ а.$$

17. Номинальный ток шунтовой обмотки

$$I_{ш\cdot н} = \frac{F_{ш\cdot н}}{2pw_ш} = \frac{8\,760}{4 \cdot 1\,100} = 1{,}99 \approx 2а.$$

18. Сечение проводника стабилизирующей обмотки

$$s_{с\cdot о} = \frac{I_{ан}}{\Delta_{с\cdot о}} = \frac{75{,}5}{3 \div 4} = 25{,}1 \div 18{,}8 \ мм^2,$$

по табл. IV-5 выбираем проводник голый $10 \times 2{,}26$; сечение $s = 22{,}1$ $мм^2$, где $\Delta_{с\cdot о} \approx \approx \Delta_ш = 3 \div 4$ $а/см^2$.

19. Сопротивление стабилизирующей последовательной обмотки: при 20° C

$$r_{с20} = \frac{2pw_{с\cdot о}\, l_{с\cdot ср}}{5\,600\, s_{с\cdot о}} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 54{,}0}{5\,600 \cdot 22{,}1} = 0{,}0035 \ ом,$$

где

$$l_{с\cdot ср} = 2\,(l_m + b_m + 4\Delta_{из}) + \pi b_к = $$

$$= 2\,(16{,}5 + 6{,}2 + 4 \cdot 0{,}2) + \pi \cdot 2 \approx 54 \ см;$$

$b_к = 2$ *см* — ширина катушки стабилизирующей обмотки;

при 115° C

$$r_{с115} = k_\vartheta\, r_{с20} = 1{,}38 \cdot 0{,}0035 = 0{,}0048 \ ом;$$

при 140° C

$$r_{с140} = 1{,}47 \cdot 0{,}0035 = 0{,}0052 \ ом.$$

20. Размещение обмоток возбуждения показано на рис. 12-29; шунтовую обмотку разбиваем на две примерно одинаковые части и между ними располагаем стабилизирующую обмотку; принимаем:

по высоте 20 рядов одной части шунтовой обмотки;
1 виток стабилизирующей обмотки;
17 рядов другой части шунтовой обмотки;

по ширине 30 витков шунтовой обмотки;
2 витка стабилизирующей обмотки;
30 витков шунтовой обмотки.

ж. Коммутация. Расчет добавочных полюсов

1. Укорочение шага якорной обмотки

$$\varepsilon_к = |\,K/2p - u_п\, y_z\,| = $$

$$= |\,105/4 - 3 \cdot 9\,| = 0{,}75.$$

2. Ширина коммутационной зоны по (12-50)

$$b_{к.з} = b'_щ + t'_к \left(u_п + \varepsilon_к - a/p \right) = $$

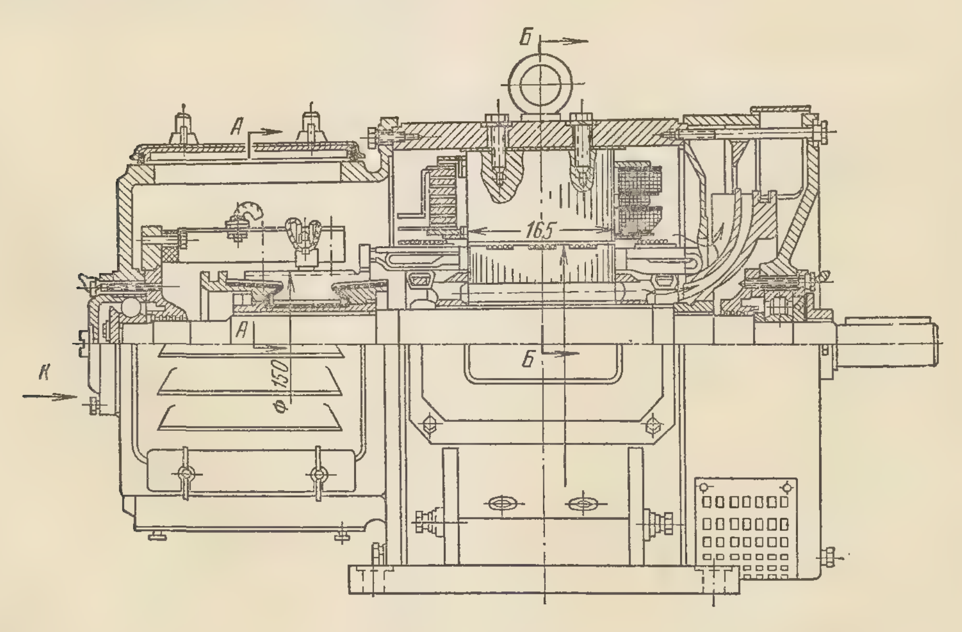


Рис. 12-29. Продольный и поперечный раз-

$$= 1{,}25 \cdot 21/15 + 0{,}45 \cdot 21/15\,(3 + 0{,}75 - ^1/_2) = $$
$$= 3{,}8\ см.$$

3. Коэффициент удельной магнитной проводимости коммутируемой секции:

по (7-23)

$$\lambda_п = \frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_4}{b_п} = \frac{22{,}2}{3 \cdot 6{,}9} + \frac{2{,}6}{6{,}8} = 1{,}45,$$

где $h_1 = 22{,}2$ *мм*, $h_4 = 2{,}6$ *мм* из рис. 12-28;

по (12-66)

$$\lambda_z = 0{,}15 \frac{b_{рд}}{k_{\delta д}\,\delta_д} =$$

$$= 0{,}15 \cdot \frac{2{,}8}{1{,}14 \cdot 0{,}27} = 1{,}36,$$

где $\delta_д = 2{,}7$ *мм* (см. п. ж8); $b_{рд} = 28$ *мм* (см. п. ж7) и $k_{\delta д} = 1{,}14$ (см. п. ж9);

по (12-49)

$$\lambda_{бж} = \frac{30\,000\,S_{бж}}{A b_{к.з}\, l_\delta} = \frac{30\,000 \cdot 0{,}33}{20 \cdot 3{,}8 \cdot 16{,}5} = 0{,}66,$$

где

$$S_{бж} = n_{бж} \frac{\pi d^2_{бж}}{4} = 42 \frac{\pi \cdot 0{,}1^2}{4} = 0{,}33\ см^2;$$

$n_{бж} = 42$ — число витков бандажа;

$d_{бж} = 0{,}1$ *см* — диаметр бандажной проволоки;

по (12-52)

$$\lambda_л \approx 0{,}5 l_л / l_\delta = 0{,}5 \cdot 23/16{,}5 = 0{,}7.$$

4. Коэффициент средней удельной магнитной проводимости по (12-47)

$$\xi = 0{,}4\pi\,(k_\lambda \lambda_п + k_\lambda \lambda_z + \lambda_{бж} + \lambda_л) =$$
$$= 0{,}4\pi\,(1{,}35 \cdot 1{,}45 + 1{,}35 \cdot 1{,}36 +$$
$$+ 0{,}66 + 0{,}7) = 6{,}3,$$

где по рис. 12-11 $k_\lambda = 1{,}35$ при $u_п = 3$; $\beta_щ = 2{,}8$ и $\varepsilon_к = 0{,}75$.

5. Средняя реактивная э.д.с. в коммутируемой секции по (12-45)

$$e_R = 2 w_p v_a A \xi l_\delta \cdot 10^{-6} =$$
$$= 2 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 240 \cdot 6{,}3 \cdot 16{,}5 \cdot 10^{-6} = 1{,}1\ в,$$

где $v_a = 11$ *м/сек*; $A = 240$ *а/см*; $w_p = w_c = 2$ (при полном числе щеточных болтов).

6. Средняя магнитная индукция в воздушном зазоре добавочного полюса по (12-65)

$$B_к = \xi A + \frac{(\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с})\,a \cdot 10^6}{2 w_c v_a l_\delta p \beta_щ} =$$
$$= 6{,}3 \cdot 240 + \frac{1{,}5 \cdot 1 \cdot 10^6}{2 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 16{,}5 \cdot 2 \cdot 2{,}8} =$$
$$= 1\,500 + 375 = 1\,875\ гс,$$

где принято $\Delta U_{щ.н} - \Delta U_{щ.с} = 1{,}5$ *в*.

7. Размеры полюсного наконечника добавочного полюса:

ширина по (12-66)

$$b_{рд} = 0{,}75\ b_{к.з} = 0{,}75 \cdot 3{,}8 = 2{,}8\ см;$$

длина $l_{рд} = l = 16{,}5$ *см*.

8. Воздушный зазор добавочного полюса

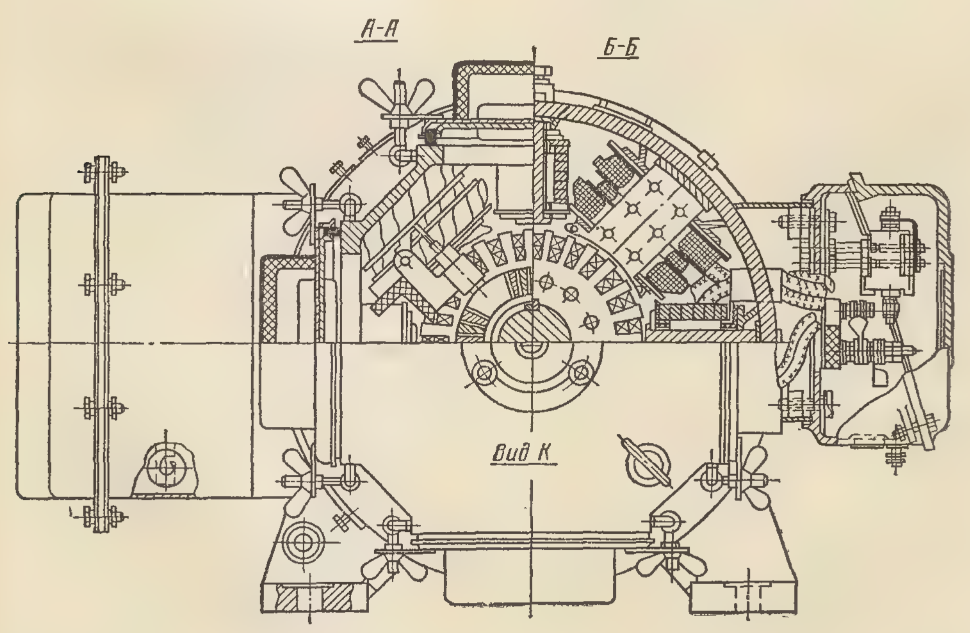
$$\delta_д = (1{,}5 \div 2)\,\delta = (1{,}5 \div 2)\,0{,}15 =$$
$$= 0{,}225 \div 0{,}3\ см.$$

Принимаем $\delta_д = 0{,}27$ *см*.

9. Коэффициент воздушного зазора для добавочных полюсов

$$k_{\delta д} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma\delta} =$$

$$= \frac{1{,}88}{1{,}88 - 0{,}865 \cdot 0{,}27} = 1{,}14,$$



резы двигателя.

где

$$\gamma = \frac{(b_п/\delta)^2}{5 + b_п/\delta} = \frac{(0,69/0,27)^2}{5+0,69/0,27} = 0,865.$$

10. Магнитный поток в воздушном зазоре добавочного полюса

$$\Phi_д = B_к \, l_{рд} \, b_{рд} = 1\,875 \cdot 16,5 \cdot 2,8 =$$
$$= 86\,000 \; мкс.$$

11. Удельная проводимость потоков рассеяния по (12-68)

$$\lambda_{\sigma д} = H'/L' + H''/L'' + 0,75H'''/L''' =$$
$$= 0,5/1,2 + 1,4/3,2 + 0,75 \cdot 6/8 = 1,36,$$

где из рис. 12-14 и 12-29 $H'=0,5$ *см*; $H''=1,4$ *см*; $H'''=6$ *см*; $L'=1,2$ *см*; $L''=3,2$ *см* и $L'''=8$ *см*.

12. Поток рассеяния добавочного полюса

$$\Phi_{\sigma д} = F_д \, l_{рд} \, \lambda_{\sigma д} \approx (1,4A\tau) \, l_{рд} \, \lambda_{\sigma д} =$$
$$= 1,4 \cdot 240 \cdot 16,5 \cdot 1,36 \approx 125\,000 \; мкс.$$

13. Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса

$$\Phi_{mд} = \Phi_д + \Phi_{\sigma д} = 86\,000 +$$
$$+ 125\,000 = 211\,000 \; мкс.$$

14. Коэффициент магнитного рассеяния добавочных полюсов

$$\sigma_д = \frac{\Phi_{mд}}{\Phi_д} = \frac{0,211 \cdot 10^6}{0,086 \cdot 10^6} = 2,52.$$

15. Проверка суммарных индукций в ярме якоря и станины при 1,5-кратной перегрузке двигателя

$$B_{a\,макс} = \frac{\Phi + 1,5\Phi_д}{2S_a} =$$
$$= \frac{(1,40 + 1,5 \cdot 0,086)\,10^6}{2 \cdot 57} = 13\,400 \; гс;$$
$$B_{c \cdot макс} = \frac{\Phi_m + 1,5\Phi_{mд}}{2S_c} =$$
$$= \frac{(1,52 + 1,5 \cdot 0,211)\,10^6}{2 \cdot 68,5} = 13\,400 \; гс.$$

Суммарные индукции якоря и станины не превышают допустимого значения 16 000 *гс*.

16. Сечения и размеры сердечника добавочного полюса по (12-71)

$$S_{mд} \geqslant \frac{\Phi_{mд}}{B_{mд}} = \frac{211\,000}{6\,000 \div 6\,500} = 35 \div 32 \; см^2.$$

Принимаем:
длина сердечника $l_{mд}=16,5$ *см*;
ширина $b_{mд}=2,5$ *см*;
сечение $S_{mд}=l_{mд}=b_{mд}=16,5 \cdot 2,5 = 41$ *см*^{2}.

17. Магнитная индукция в сердечнике

$$B_{mд} = \frac{\Phi_{mд}}{S_{mд}} = \frac{211\,000}{41} = 5\,300 \; гс.$$

18. Намагничивающая сила обмотки добавочных полюсов

$$F_д = 1,1 \cdot 1,6 B_к \, k_{\delta д} \, \delta_д + A\tau =$$
$$= 1,1 \cdot 1,6 \cdot 1\,875 \cdot 1,14 \cdot 0,27 +$$
$$+ 240 \cdot 16,5 = 5\,020 \; a.$$

19. Число витков добавочных полюсов на один полюс

$$w_д = \frac{F_д}{2I_{ан}} = \frac{5\,020}{2 \cdot 75,5} = 33,1;$$

принимаем $w_д=33$ витка.

20. Сечение и размеры провода обмотки добавочных полюсов принимаем такими же, как для стабилизирующей обмотки (см. п. е18).

21. Сопротивления обмотки добавочных полюсов:

при 20°C

$$r_{д20} = \frac{2pw_д \, l_{д \cdot ср}}{5\,600 s_д} =$$
$$= \frac{4 \cdot 33 \cdot 47,1}{5\,600 \cdot 22,1} = 0,051 \; ом;$$

при 115° C

$$r_{д115} = k_\vartheta \, r_{д20} = 1,38 \cdot 0,051 = 0,070 \; ом;$$

при 140° C

$$r_{д140} = 1,47 \cdot 0,051 = 0,075 \; ом,$$

где

$$l_{д \cdot ср} = 2\,(l_{mд} + b_{mд} + 4\Delta_{из}) + \pi b_к =$$
$$= 2\,(16,5 + 2,5 + 4 \cdot 0,2) + \pi \cdot 2,4 \approx 47 \; см.$$

22. Размещение обмотки показано на рис. 12-29:
по высоте 33 витка
по ширине 1 виток.

з) Потери и к. п. д.

1. Вес ярма якоря

$$G_a = 7,8 \cdot 2pL_a S_a \cdot 10^{-3} =$$
$$= 7,8 \cdot 4 \cdot 9,25 \cdot 75 \cdot 10^{-3} = 16,4 \; кг.$$

2. Вес зубцов якоря

$$G_z = 7,8 Z h_z \, k_c \, l b_{z2} \cdot 10^{-3} =$$
$$= 7,8 \cdot 35 \cdot 2,7 \cdot 0,93 \cdot 16,5 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} = 10,8 \; кг.$$

3. Частота перемагничивания стали якоря

$$f = \frac{pn_н}{60} = \frac{2 \cdot 1\,000}{60} = 33,3 \; гц.$$

4. Основные потери в стали ярма якоря по (8-23)

$$P_{ca} = C_a \left(\frac{B_a}{10\,000}\right)^2 G_a =$$
$$= 6,9 \cdot 1,225^2 \cdot 16,4 = 170 \; вт,$$

где

$$C_a = \frac{f\,(f + 70)}{500} = \frac{33,3\,(33,3 + 70)}{500} =$$
$$= 6,9 \; вт/кг \text{ для стали Э11, 0,5 } мм.$$

5. Основные потери в стали зубцов якоря по (8-25)

$$P_{cz} = C_z \left(\frac{B_{z2}}{10\,000}\right)^2 G_z =$$
$$= 6 \cdot 1,67^2 \cdot 10,8 = 180 \; вт,$$

$$C_z = \frac{f(f+30)}{350} =$$

$$= \frac{33,3\,(33,3+30)}{350} = 6 \text{ вт/кг};$$

для стали Э11, 0,5 *мм*;

$$B_{z2} = 85,6E_a = 85,6 \cdot 195 = 16\,700 \text{ гс}.$$

6. Удельные поверхностные потери в полюсных наконечниках по (8-28)

$$p_{пов} = k_0 \left(\frac{Zn_н}{10\,000}\right)^{1,5} \left(\frac{B_0 t_1}{1\,000}\right)^2 =$$

$$= 2\left(\frac{35 \cdot 1\,000}{10\,000}\right)^{1,5} \left(\frac{2\,850 \cdot 1,88}{1\,000}\right)^2 =$$

$$= 380 \text{ вт/м}^2,$$

где $k_0 = 2$ из табл. 8-1;

$$B_0 = \beta_0 k_{\delta 1} B_\delta =$$

$$= 0,265 \cdot 1,36 \cdot 7\,900 = 2\,850 \text{ гс};$$

$\beta_0 = 0,265$ по рис. 8-4 для $b_п/\delta = 6,9/0,15 = 4,6$.

7. Полные поверхностные потери по (8-29)

$$P_{пов} = 2p\tau\alpha_p l_p p_{пов} \cdot 10^{-4} =$$

$$= 4 \cdot 16,5 \cdot 0,65 \cdot 16,5 \cdot 380 \cdot 10^{-4} = 27 \text{ вт}.$$

8. Полные потери в стали

$$P_c = P_{ca} + P_{cz} + P_{пов} =$$

$$= 170 + 180 + 27 = 377 \text{ вт}.$$

9. Механические потери по рис. 8-3

$$P'_{мех} = 114 \text{ вт при } n_н = 1\,000 \text{ об/мин}.$$

10. Механические потери трения щеток на коллекторе по (8-8)

$$P_{тр.щ} = 9,81 k_{тр} p_щ S_щ v_к =$$

$$= 9,81 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 257,8 = 77 \text{ вт},$$

где

$$S_щ = 2pN_щ b_щ l_щ =$$

$$= 4 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 2,5 = 25 \text{ см}^2;$$

$$v_к = \frac{\pi D_к n_н}{6\,000} = \frac{\pi \cdot 15 \cdot 1\,000}{6\,000} = 7,8 \text{ м/сек}.$$

11. Полные механические потери

$$P_{мех} = P'_{мех} + P_{тр.щ} = 114 + 77 = 190 \text{ вт}.$$

12. Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{эа} = I^2_{ан} r_{a115} = 75,5^2 \cdot 0,224 = 1\,270 \text{ вт}.$$

13. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$P_{э.д} = I^2_{ан} r_{д115} = 75,5^2 \cdot 0,070 = 400 \text{ вт}.$$

14. Электрические потери в стабилизирующей обмотке

$$P_{э.с} = I^2_{ан} r_{c115} = 75,5^2 \cdot 0,0073 = 43 \text{ вт}.$$

15. Электрические потери в переходном щеточном контакте

$$P_{э.щ} = 2\Delta U_щ I_{ан} = 2 \cdot 75,5 = 151 \text{ вт}.$$

16. Полные электрические потери в цепи якоря

$$P_э = P_{эа} + P_{э.д} + P_{э.с} + P_{э.щ} =$$

$$= 1\,270 + 400 + 43 + 151 = 1\,864 \text{ вт}.$$

17. Электрические потери в шунтовой обмотке

$$P_{э.ш} = I^2_{ш.н} r_{ш140} \approx 2^2 \cdot 98,5 = 395 \text{ вт}.$$

18. Полные электрические потери в цепи шунтовой обмотки

$$P_ш = U_н I_{ш.н} = 220 \cdot 2 \approx 440 \text{ вт}.$$

19. Добавочные потери по ГОСТ 186-66

$$P_{доб} = 0,01 U_н I_н = 0,01 \cdot 220 \cdot 77,5 = 170 \text{ вт},$$

где

$$I_н = I_{ан} + I_{ш.н} \approx 75,5 + 2 = 77,5 \text{ вт}.$$

Как показали расчеты по (8-51), добавочные коммутационные потери ничтожно малы.

20. Полные потери двигателя при номинальном режиме

$$\Sigma P = 1\,864 + 377 + 440 + 190 + 170 \approx$$

$$\approx 3\,041 \text{ вт} \approx 3 \text{ квт}.$$

21. Потребляемая мощность двигателя

$$P_{1н} = U_н I_н \cdot 10^{-3} = 220 \cdot 77,5 \cdot 10^{-3} = 17 \text{ квт}.$$

22. Полезная мощность на валу

$$P_{2н} = P_{1н} - \Sigma P = 17 - 3 = 14 \text{ квт}.$$

23. Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta_н = P_{2н}/P_{1н} \cdot 100 = 14/17 \cdot 100 = 82,4\%.$$

и) Рабочие характеристики

Рассчитаем характеристики n, M, I, P_1, $\eta = f(P_2)$ при $U_н = 220$ *в*, токе возбуждения $I_{ш.н} = 1,99 \approx 2$ *а*, соответствующем низшей номинальной скорости вращения $n_{н(н)} = 1\,000$ *об/мин*. Примем, что холостые потери якоря с нагрузкой практически не изменяются

$$P_{0a} = P_c + P_{мех} = 377 + 190 = 567 \text{ вт} = \text{const}.$$

Допустим, что н. с. размагничивающего действия реакции якоря приближенно изменяется пропорционально току якоря

$$F_{р.я} = 2pF_{qdн} \frac{I_a}{I_{ан}} = 4 \cdot 300 \frac{I_a}{75,5} = 15,9 I_a.$$

1. Задаваясь током якоря, определяем индуктируемую э. д. с. якоря

$$E_a = U_н - I_a \left(r_{a\,115} + r_{д\,115} + r_{c\,115} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\Delta U_щ}{I_{ан}}\right) = 220 - I_a\,(0,224 + 0,07 +$$

$$+ 0,0048 + 2/75,5) = 220 - 0,33 I_a, \text{ в}.$$

2. Вычисляем результирующую н. с. возбуждения при

$$F_{ш.н} = 2pI_{ш.н} w_ш = 4 \cdot 1,99 \cdot 1\,100 = 8\,760 \text{ а};$$

$$F_E = F_{ш.н} + F_{c.o} - F_{р.я} = 8\,760 +$$

$$+ 4 \cdot 2 I_a - 15,9 I_a = 8630 \text{ а}.$$

3. По значению F_E находим из кривой рис. 12-27 удельную э. д. с. якоря

$$e_n = E_a/n.$$

4. Определяем скорость вращения якоря

$$n = E_a/e_n, \ \text{об/мин}.$$

5. Вычисляем полный ток якоря

$$I = I_a + I_{\text{ш.н}} \approx I_a + 2 \ a.$$

6. Ток якоря при холостом ходе

$$I_{0a} = \frac{P_{0a}}{U_{\text{н}}} = \frac{567}{220} = 2{,}6 a.$$

7. Потребляемая мощность двигателя

$$P_1 = U_{\text{н}} I \cdot 10^{-3} = 220 \cdot 10^{-3} I, \ \text{квт}.$$

8. Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = [E_a I_a - P_{0a} - P_{\text{доб}} (I/I_{\text{н}})^2]\, 10^{-3} =$$

$$= [E_a I_a - 567 - 0{,}028 I^2]\, 10^{-3} \ \text{квт},$$

где $I_{\text{н}}=77{,}5$ *а*.

9. Вращающий момент $M=973\ P_2/n$ *кГ·м*.

10. Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2/P_1 \cdot 100\%.$$

Расчеты, выполненные по пп. 1—10, приведены в табл. 12-13Б.

Все характеристики для основной низшей скорости $n_{\text{н(н)}}=1\,000$ *об/мин* изображены на рис. 12-30.

Изменение скорости вращения двигателя при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной составило:

$$\frac{n_{0(\text{н})} - n_{\text{н(н)}}}{n_{\text{н(н)}}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{1090 - 1\,000}{1000} \cdot 100 = 9\%,$$

где $n_{0(\text{в})}=1\,090$ *об/мин* (табл. 12-13Б). Для высшей скорости вращения, равной по заданию $n_{\text{н(в)}}=2{,}25 \cdot 1\,000=2\,250$ *об/мин*, ограничиваемся расчетом номинального режима, соответствующего $P_{\text{н}}=14$ *квт*, $U_{\text{н}}=220$ *в*, $n_{\text{н(в)}}=2\,250$ *об/мин*.

11. Потери холостого хода

$$P_{0a(\text{в})} = P'_{\text{мех}} \left(\frac{n_{\text{н(в)}}}{n_{\text{н(н)}}}\right)^3 + P_{\text{тр.щ}} \frac{n_{\text{н(в)}}}{n_{\text{н(н)}}} +$$

$$+ P_{\text{с}} = 114 \left(\frac{2\,250}{1\,000}\right)^3 + 77 \cdot \frac{2\,250}{1\,000} +$$

$$+ 377 = 1\,130 \ \text{вт}.$$

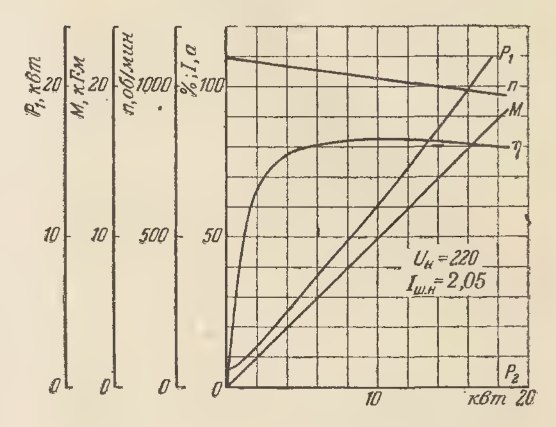


Рис. 12-30. Рабочие характеристики двигателя.

12. Ток холостого хода

$$I_{0a(\text{в})} = \frac{P_{0a(\text{в})}}{U_{\text{н}}} = \frac{1\,130}{220} \approx 5{,}1 \ a.$$

13. Предварительное значение тока якоря при номинальной нагрузке принято

$$I_{a\text{н(в)}} = I_{a\text{н(н)}} + I_{0a(\text{в})} = 75{,}5 + 5{,}1 \approx 80 \ a;$$

в результате окончательных расчетов получено значение $I_{a\text{н(в)}}=79$ *а*.

14. Электродвижущая сила якоря

$$E_{a\,\text{н(в)}} = U_{\text{н}} - 0{,}33 I_{a\text{н(в)}} =$$

$$= 220 - 0{,}33 \cdot 79 = 194 \ \text{в}.$$

15. Значение н. с. $F_{E(\text{в})}$ находится по характеристике (рис. 12-27) $e_n=E/n=f(F_0)$ для $e_{n(\text{в})}=E_{a\text{н(в)}}/n_{\text{н(в)}}=194/2\,250=0{,}086$; $F_{E(\text{в})}=3\,000$ *а*.

Таблица 12-13Б

Данные расчета рабочих характеристик двигателя

$U_{\text{н}}=220$ *в*, $I_{\text{ш(н)}}=1{,}99$ *а*, $I_{\text{ш(в)}}=0{,}65$ *а*

№ п/п.	$I_{\text{ш}}$, *а*	I_a, *а*	E_a, *в*	F_E, *а*	e_n, *в·мин/об*	*n*, *об/мин*	*M*, *кГ·м*	P_2, *квт*	*I*, *а*	P_1, *квт*	η, %
1	1,99	2,6	220	8 760	0,201	1 090	0	0	4,6	1,0	0
2		10	216,7	8 680	0,200	1 080	1,4	1,6	12	2,6	60,5
3		25	211,7	8 560	0,199	1 060	4,26	4,7	27	6,0	79
4		50	203,5	8 360	0,198	1 030	8,7	9,35	52	11,4	82
5		75,5	195	8 160	0,195	1 000	13,6	14	77,5	17	82,5
6		100	187	7 870	0,192	980	18	17,8	102	22,4	79,5
1	0,65	5,1	220	2 850	0,083	2650	0	0	5,8	1,27	0
2		79	194	3 000	0,086	2 250	6,1	14	80	17,6	79,5

16. Магнитная индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta(в)} = B_{\delta н}\, n_{н(н)} / n_{н(в)} =$$

$$= 7\,900 \cdot \frac{1\,000}{2\,250} = 3\,500 \ гс.$$

17. Размагничивающая реакция якоря определяется по переходной характеристике при $B_{\delta(в)}=3\,500$ гс и b_δ $A_{(в)}=10{,}7 \cdot 240 \times \times 79/75{,}5=2\,700$ а. Из графика рис. 12-28 следует, что предварительное значение н. с.

$$F'_{qd(в)} = \frac{1}{6} \frac{\Delta B'_{1(в)} - \Delta B'_{2(в)}}{\Delta B'_{1(в)} + \Delta B'_{2(в)}} b_\delta\, A_{(в)} =$$

$$= \frac{1}{6} \cdot \frac{7\,900 - 4\,700}{7\,900 + 4\,700} \cdot 2\,700 = 115 \ а;$$

уточненное значение после сдвига трапеции на $\frac{1}{2} F'_{qd(в)}$ $=58$ а (рис. 12-28)

$$F_{qd(в)} = \frac{1}{6} \frac{\Delta B'_{1(в)} - \Delta B'_{2(в)}}{\Delta B_{1(в)} + \Delta B_{2(в)}} b_\delta\, A_{(в)} =$$

$$= \frac{1}{6} \cdot \frac{7\,900 - 4\,700}{7\,100 + 5\,000} \cdot 2\,700 = 120 \ а.$$

Следовательно, $F_{р.я(в)}=2p$ $F_{qd(в)}=4 \cdot 120 = 480$ а.

18. Намагничивающая сила шунтовой обмотки

$$F_{ш(в)} = F_{E(в)} + F_{р.я(в)} - F_{с.о(в)} =$$

$$= 3\,000 + 480 - 630 \approx 2\,850 \ а,$$

где

$$F_{с.о(в)} = 2pw_{с.о}\, I_{ан(в)} = 4 \cdot 2 \cdot 79 \approx 630 \ а.$$

19. Ток шунтовой обмотки при $n_{н(в)} = 2\,250$ об/мин

$$I_{ш(в)} = \frac{F_{ш(в)}}{2pw_{ш}} = \frac{2\,850}{4 \cdot 1\,100} = 0{,}65 \ а.$$

20. Полный ток двигателя

$$I_{н(в)} = I_{а\, н(в)} + I_{ш(в)} = 79 + 0{,}69 \approx 80 \ а.$$

21. Потребляемая мощность

$$P_{1н(в)} = U_н\, I_{н(в)} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 220 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 17{,}6 \ квт.$$

22. Мощность на валу двигателя

$$P_{2н(в)} = \left[E_{а\, н(в)}\, I_{а\, н(в)} - P_{0а(в)} - P_{доб}\right] 10^{-3} =$$

$$= [194 \cdot 79 - 1\,130 - 170]\, 10^{-3} \approx 14 \ квт.$$

23. Вращающий момент двигателя

$$M = 0{,}975 P_{2н(в)} / n_{н(в)} =$$

$$= 0{,}973 \cdot \frac{14}{2\,250} \approx 6 \ кГ \cdot м.$$

24. Коэффициент полезного действия

$$\eta_{н(в)} = P_{2н(в)} / P_{1н(в)} \cdot 100 =$$

$$= \frac{14}{17{,}6} \cdot 100 = 79{,}5\%.$$

25. Скорость вращения при холостом ходе

$$n_{0(в)} = U_н / e_{n0} = 220/0{,}083 = 2\,650 \ об/мин,$$

где $e_{n0}=0{,}083$ при $F_{ш(в)}=2\,850$ а (рис. 12-27).

26. Процентное изменение скорости вращения

$$\frac{n_{0(в)} - n_{н(в)}}{n_{н(в)}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{2\,650 - 2\,250}{2\,250} \cdot 100 \approx 18\%.$$

к) К вентиляционному расчету

На валу двигателя установлен центробежный вентилятор с радиальными лопатками (рис. 12-29). Внешний диаметр лопаток $D_2=35$ см, внутренний диаметр $D_1=20$ см, ширина лопаток $b_л=4$ см, число лопаток 21. Гидравлическое сопротивление вентиляционной системы машины $Z=700$.

Проверим вентилирующую способность вентилятора при низшей скорости вращения $n_{н(н)}=1\,000$ об/мин.

1. Количество охлаждающего воздуха для отвода тепловых потерь по (10-1)

$$V_в = \frac{\Sigma P_в}{c_в \Theta_в} = \frac{2\,950}{1\,100 \cdot 20} = 0{,}134 \ м^3/сек,$$

где $\Sigma P_в = 2950$ вт — потери, отводимые воздухом;

$\Theta_в = 20°$ С — подогрев воздуха в машине.

2. Необходимый рабочий напор вентилятора по (10-2), Z по рис. 10-23

$$H = ZV^2 = 700 \cdot 0{,}134^2 = 12{,}5 \ кГ/м^2.$$

3. Напор холостого хода вентилятора по (10-53)

$$H_0 = 0{,}0735 \left(u_2^2 - u_1^2\right) =$$

$$= 0{,}0735\, (18{,}3^2 - 10{,}5^2) = 16{,}5 \ кГ/м^2,$$

где

$$u_2 = \frac{\pi D_2\, n_{н(н)}}{6000} = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 1\,000}{6\,000} = 18{,}3 \ м/сек;$$

$$u_1 = \frac{\pi D_1\, n_{н(н)}}{6\,000} = \frac{\pi \cdot 20 \cdot 1\,000}{6\,000} =$$

$$= 10{,}5 \ м/сек.$$

4. Максимальный расход вентилятора по (10-39б)

$$V_{макс} = 0{,}42 u_2\, S_2 =$$

$$= 0{,}42 \cdot 18{,}3 \cdot 0{,}04 = 0{,}31 \ м^3/сек,$$

$$где\ S_2 = 0{,}92 \pi D_2\, b_л \cdot 10^{-4} =$$

$$= 0{,}92 \pi \cdot 35 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0{,}04 \ м^2.$$

5. В результате совместного решения уравнений (10-2) и (10-1) находим данные рабочего режима вентилятора:

$$H = 13{,}2 \ кг/см^2; \quad V = 0{,}137 \ м^3/сек;$$

так как $V > V_в$, то вентилятор отвечает требованиям охлаждения машины.

6. Мощность, потребляемая вентилятором, по (10-57)

$$P_в = 9,81 \frac{VH}{\eta_э} = 9,81 \cdot \frac{0,137 \cdot 13,2}{0,20} = 89 \text{ вт}.$$

л) Тепловой расчет

Расчет выполнен по упрощенным формулам § 11-6.

1. Перепад температуры в пазовой изоляции якорной обмотки по (11-96)

$$\Theta_{из} = \frac{A\Delta_a k_f t_1 \delta_{из}}{\gamma_\vartheta \lambda \Pi} =$$

$$= \frac{240 \cdot 8,3 \cdot 1,88 \cdot 0,13}{3\,800 \cdot 0,16 \cdot 10^{-2} \cdot 4,7} = 17° \text{ C},$$

где $A = 240$ *а/см*; $\Delta_a = 8,3$ *а/мм²*; $k_f = 1$;
$t_1 = 1,88$ *см* — зубцовое деление якоря;
$\Pi = 4,7$ *см* — периметр теплопередачи в пазовой изоляции;
$\delta_{из} = 0,13$ *см* — односторонняя толщина изоляции из табл. 12-14;
$\gamma_\vartheta = 3\,800$ из табл. 11-8;
$\lambda = 0,16 \cdot 10^{-2}$ из табл. 11-3.

2. Удельный тепловой поток теплорассеивающей поверхности сердечника якоря по (11-98)

$$q_\alpha = \frac{A\Delta_a k_f}{\gamma_\vartheta \left(1 + \frac{n_к d_к}{D}\right)} + \frac{P'_c}{\pi D l \left(1 + \frac{n_к d_к}{D}\right)} =$$

$$= \frac{240 \cdot 8,3 \cdot 1}{3\,800 \left(1 + \frac{14 \cdot 1,7}{21}\right)} + \frac{350}{\pi \cdot 21 \cdot 16,5 \left(1 + \frac{14 \cdot 1,7}{21}\right)} = 0,39 \text{ вт/см}^2,$$

где $n_к = 14$ — число аксиальных каналов;
$d_к = 1,7$ *см* — диаметр канала;
$P'_c = 350$ *вт* — потери в стали сердечника якоря.

3. Коэффициент теплоотдачи поверхности якоря по (11-99б)

$$\alpha_в = 2,2 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 v_в) =$$

$$= 2,2 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 \cdot 18,8) =$$

$$= 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град},$$

где $v_в = u_2 = 18,8$ *м/сек* — окружная скорость вентилятора.

4. Превышение температуры сердечника якоря над температурой охлаждающего воздуха по (11-100)

$$\Theta_\alpha = q_\alpha / \alpha_в = \frac{0,39}{6,3 \cdot 10^{-3}} = 63° \text{ C}.$$

5. Удельный тепловой поток лобовых частей обмотки якоря по (11-101)

$$q_л = \frac{1,4 A \Delta_a}{\gamma_\vartheta} = \frac{1,4 \cdot 240 \cdot 8,3}{3\,800} =$$

$$= 0,74 \text{ вт/град} \cdot \text{см}^2.$$

6. Коэффициент теплоотдачи поверхности лобовых частей обмотки якоря по (11-102)

$$\alpha_л = 3 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 v_a) =$$

$$= 3 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 \cdot 18,8) =$$

$$= 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град} \cdot \text{см}^2.$$

7. Превышение температуры поверхности лобовых частей над температурой охлаждающего воздуха

$$\Theta_л = q_л / \alpha_л = 0,74 / 8,6 \cdot 10^{-3} = 86° \text{ C}.$$

8. Среднее превышение температуры обмотки якоря по (11-10)

$$\Theta_a = \frac{(\Theta_и + \Theta_\alpha) l + \Theta_л l_л}{l + l_л} =$$

$$= \frac{(17 + 63)\,16,5 + 86 \cdot 23}{16,5 + 23} \approx 84° \text{ C}.$$

9. Среднее значение температуры обмотки якоря по (11-59)

$$\vartheta_a = \Theta_a + \frac{\Theta_в}{2} + \vartheta_0 = 84 +$$

$$+ \frac{20}{2} + 40 = 134° \text{ C},$$

где $\Theta_в = 20°$ C — разность температур охлаждающего воздуха на входе и выходе;
$\vartheta_0 = 40°$ C — стандартная температура входящего охлаждающего воздуха.

10. Удельный тепловой поток с теплорассеивающей поверхности шунтовой обмотки по (11-105)

$$q_ш = \frac{P_{э.ш}}{S_ш} = \frac{395}{1\,760} = 0,226 \text{ вт/см}^2,$$

где $P_{э.ш} = 395$ *вт* — потери в шунтовой обмотке;
$S_ш = 1\,760$ *см²* — теплорассеивающая поверхность катушек (рис. 12-29).

11. Коэффициент теплоотдачи поверхности катушек шунтовой обмотки по (11-106)

$$\alpha_ш = 2,2 \cdot 10^{-3} (1 + 0,25 v_в) =$$

$$= 2,2 \cdot 10^{-3} (1 + 0,25 \cdot 8) =$$

$$= 6,6 \cdot 10^{-3}, \text{ вт/град} \cdot \text{см}^2,$$

где $v_в = 8$ *м/сек* — скорость охлаждающего воздуха.

12. Превышение температуры шунтовой обмотки над температурой охлаждающего воздуха по (11-107)

$$\Theta_ш = q_ш / \alpha_ш = 0,225 / 6,6 \cdot 10^{-3} \approx 38° \text{ C}$$

13. Удельный тепловой поток с теплорассеивающей поверхности добавочных полюсов по (11-105)

$$q_д = P_{э.д}/S_д = \frac{425}{1\,440} = 0{,}28\ вт/см^2,$$

где $P_{э.д} = 425$ *вт* — потери в обмотке добавочных полюсов;

$S_д = 1\ 440$ *см²* — теплорассеивающая поверхность добавочных полюсов (рис. 12-29).

14. Коэффициент теплорассеяния обмотки добавочных полюсов

$$\alpha_д \approx \alpha_ш = 6{,}6 \cdot 10^{-3}\ вт/град \cdot см^2.$$

15. Превышение температуры обмотки добавочных полюсов по (11-107)

$$\Theta_д = q_д/\alpha_д = 0{,}29/6{,}6 \cdot 10^{-3} = 45°\,С.$$

16. Превышение температуры поверхности коллектора по (11-49)

$$\Theta_к = \frac{P'_{э.щ} + P_{тр.щ}}{5 \cdot 10^{-3}\left(1 + k\sqrt{v_к}\right)} = \frac{151 + 77}{5 \cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}7\sqrt{7{,}8}\right)} = 15{,}5°\,С,$$

где $P_{э.щ} = 151$ *вт* — электрические потери в щеточном контакте;

$P_{тр.щ} = 77$ *вт* — механические потери щеточного контакта;

$v_к = 7{,}8$ *м/сек* — окружная скорость коллектора.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ МАШИН

13-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В данной главе рассматривается расчет трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами и короткозамкнутых, имеющих открытое или защищенное исполнение и предназначенных для продолжительного режима работы. Рассматриваются также особенности расчета закрытых обдуваемых двигателей, спрос на которые со стороны многих отраслей промышленности с каждым годом возрастает.

Наибольшее распространение получили двигатели общепромышленного применения мощностью от 0,6 до 100 *квт*,* производство которых на электромашиностроительных заводах носит серийно-массовый характер. Потребность в таких двигателях весьма велика — в Советском Союзе ежегодно по мощности она исчисляется десятками миллионов киловатт, а по количеству составляет несколько миллионов двигателей. Из них наиболее широко в настоящее время применяются короткозамкнутые двигатели. Эти двигатели мощностью до 100 *квт*, как правило, выполняются с роторной обмоткой в виде беличьей клетки, полученной путем заливки пазов расплавленным алюминием. При этом для мощности свыше 10—15 *квт* выбираются углубленные пазы (глубиной 25—45 *мм*) овальные, грушевидные или с параллельными стенками, при которых получается повышение активного сопротивления роторной обмотки в начале пуска ($s = 1$) в 1,3—2,5 раза, что приводит к достаточному в обычных случаях улучшению пусковых характеристик двигателя.

Двигатели с контактными кольцами мощностью до 100 *квт* изготовляются сравнительно в небольшом количестве, обычно без приспособлений для подъема щеток и замыкания колец накоротко, так как применение таких приспособлений делает двигатели менее надежными в эксплуатации и усложняет их изготовление.

Совершенно открытое исполнение для указанных двигателей встречается редко. Обычно они выполняются или защищенными, или закрытыми. В последнем случае применяется внешний обдув поверхности корпуса статора, который снаружи делается ребристым.

Опыт эксплуатации двигателей на самых различных предприятиях показывает, что одна из причин преждевременного выхода их из строя — это попадание в них посто-

* Имеются в виду двигатели при $2p = 4$; при $2p > 4$ их мощности снижаются, а при $2p = 2$ возрастают.

ронних предметов, охлаждающей жидкости (на станках), засасывание пыли, забивающей вентиляционные пути и тем самым ухудшающей условия охлаждения. Поэтому более надежная защита, а также закрытое исполнение повышают надежность двигателей и удлиняют срок их службы.

В настоящее время намечается выпускать двигатели мощностью до 10 *квт* ($2p=4$) только в закрытом исполнении.

Двигатели мощностью до 100 *квт* иногда выполнялись с аксиальной вентиляцией при наличии вентилятора с относительно большим диаметром, что позволяло повысить электромагнитные нагрузки и несколько снизить вес двигателей. В последние годы эти двигатели строятся с двусторонней радиальной вентиляцией. При этой вентиляции отпадает необходимость иметь особый вентилятор, который при резко ударной нагрузке и при реверсировании иногда приводил к повреждению машины. Изготовление машин при отсутствии такого вентилятора упрощается. Однако в ряде случаев (например, при $2p=2$ или $2p=4$) двигатели с аксиальной вентиляцией по затрате материалов получаются более выгодными. Для них в настоящее время могут быть применены достаточно надежные центробежные вентиляторы, отлитые из алюминиевого сплава. При этом машины можно выполнять с относительно большей длиной статора и ротора без радиальных вентиляционных каналов.

Нормальные серийные двигатели на мощности свыше 100 *квт* также имеют радиальную вентиляцию при защищенной конструкции. Для них, кроме того, предусматривается исполнение, позволяющее подводить охлаждающий воздух по трубам.

В последние годы возрастает спрос на закрытые двигатели мощностью свыше 100 *квт*. Применение для таких двигателей на мощности выше 320—400 *квт* при $2p=4$ закрытой конструкции с обдувом внешней ребристой поверхности корпуса статора не обеспечивает надлежащих условий охлаждения, что заставляет в этом случае переходить к закрытым машинам с радиаторным охлаждением.

Короткозамкнутые двигатели на те же мощности (>100 *квт*) выполняются с ротором, имеющим глубокие пазы, или пазы, утолщенные в нижней части, или двойную клетку. Двойная клетка обычно применяется для быстроходных двигателей (при $2p$, равном 4 или 6), от которых требуется повышенный пусковой момент, особенно в тех случаях, когда двигатели пускаются в ход при пониженном напряжении.

При проектировании трехфазного асинхронного двигателя бывают заданы следующие номинальные величины:

1) мощность на валу $P_н$, *вт* или *квт*;

2) линейное напряжение $U_н$, *в* или *кв* (при соединении обмотки статора в звезду — междуфазное, при соединении в треугольник — фазное);

3) частота тока f, *гц*;

4) скорость вращения n_1, *об/мин* (задается синхронная скорость вращения).

Если в проектном задании не ставится особых требований, то в отношении других величин, характеризующих работу двигателя, он должен удовлетворять требованиям действующих ГОСТ. Здесь имеются в виду к. п. д., $\cos\varphi$, максимальный вращающий момент, а для короткозамкнутых двигателей, кроме того, начальный и минимальный пусковые моменты. О последних величинах, так же как и о других требованиях, предъявляемых к асинхронным двигателям, сказано в последующем.

Сопряжение фаз обмотки статора (звезда или треугольник) выбирается в зависимости от заданного номинального напряжения. Если заданы напряжения 127/220, 220/380 или 380/660 *в*, то обмотка должна быть рассчитана соответственно на фазное напряжение 127, 220 или 380 *в*. От обмотки к коробке с зажимами должны быть выведены все шесть концов.

При номинальных напряжениях

500, 3 000, 6 000 *в* выбирается соединение фаз звездой или треугольником в зависимости от того, какое из этих соединений дает более выгодную обмотку в отношении числа витков ее фазы, сечения проводников и их укладки в пазах. Здесь от обмотки к коробке с зажимами иногда выводятся также шесть концов, чтобы можно было проверить изоляцию между фазами.

13-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

В гл. 1 указывалось, что главные размеры электрической машины D и l_δ зависят от максимальной индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки якоря (статора) A. При этом также отмечалось, что от соотношения между B_δ и A зависят рабочие и пусковые характеристики двигателя.

Коэффициент мощности ($\cos\varphi$) двигателя зависит главным образом от относительного значения намагничивающего тока $I_\mu/I_н$. Намагничивающий ток по (6-85)

$$I_\mu = \frac{pF_{цепи}}{0{,}9 m_1 w_1 k_{01}}.$$

Если принять $F_{цепи} = 1{,}6\, k_\mu k_\delta \delta B_\delta$ где k_μ — коэффициент, учитывающий насыщение стальных участков магнитной цепи двигателя, и учесть, что $\frac{m_1 w_1}{p} I_н = A\tau$, то можно написать:

$$\frac{I_\mu}{I_н} = 1{,}78 \frac{k_\mu k_\delta}{k_{01}} \frac{\delta}{\tau} \frac{B_\delta}{A}. \quad (13\text{-}1)$$

Последнее равенство показывает, что при увеличении B_δ и уменьшении A относительное значение $I_\mu/I_н$ возрастает и, следовательно, $\cos\varphi$ ухудшается. Из равенства (13-1) также следует, что для тихоходных двигателей (при большом $2p$) $\cos\varphi$ получается меньше, чем для быстроходных (при малом $2p$), так как в первом случае отношение δ/τ больше, чем во втором случае.

Максимальный вращающий момент $M_м$, который определяет способность двигателя к перегрузке (по моменту), зависит от индуктивного сопротивления рассеяния $x_к \approx x_1 + x_2'$: чем меньше $x_к$, тем больше максимальный вращающий момент. Значение $x_к$ в относительных единицах можно выразить следующим образом:

$$\frac{I_н x_к}{U_1} = \Lambda \frac{A}{B_\delta}. \quad (13\text{-}2)$$

где U_1 — номинальное фазное напряжение; Λ — коэффициент, характеризующий рассеяние.

Для данной машины при постоянных значениях $P_н$, U_1, τ, $2p$ и произведения AB_δ, но при изменении A/B_δ, что получается при изменении числа витков обмотки статора w_1, значение Λ остается почти неизменным. Поэтому для уменьшения $I_н x_к/U_1$, если необходимо, например, повысить $M_м$, следует увеличить B_δ и уменьшить A.

Значения электромагнитных нагрузок B_δ и A в зависимости от полюсного деления τ рекомендуется выбирать по кривым (рис. 13-1).

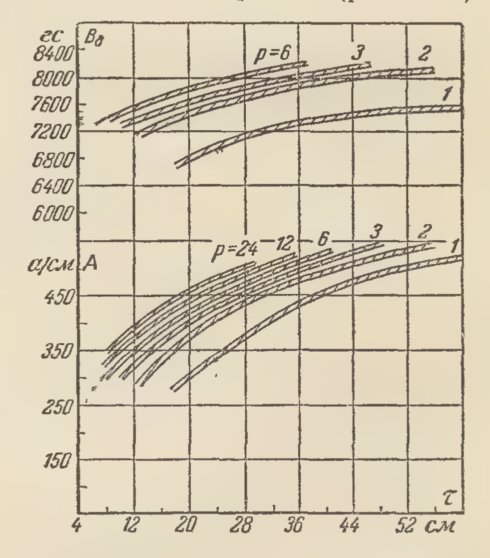


Рис. 13-1. Максимальная индукция в воздушном зазоре B_δ (с учетом уплощения кривой поля) и линейная нагрузка A в зависимости от полюсного деления τ для машин защищенной конструкции.

Они получены как усредненные значения по данным современных двигателей защищенного исполнения при изоляции не ниже класса E с учетом современных тенденций к повышению надежности, $\cos\varphi$ и к. п. д. двигателей; при этом значения B_δ

получены с учетом уплощения кривой поля машины.

Если применяются изоляционные материалы класса А, то нагрузки должны быть снижены примерно на 5—10%. Нагрузки даны для машин, имеющих радиальную вентиляцию. При достаточно интенсивной аксиальной вентиляции они могут быть несколько увеличены, примерно на 3—5%.

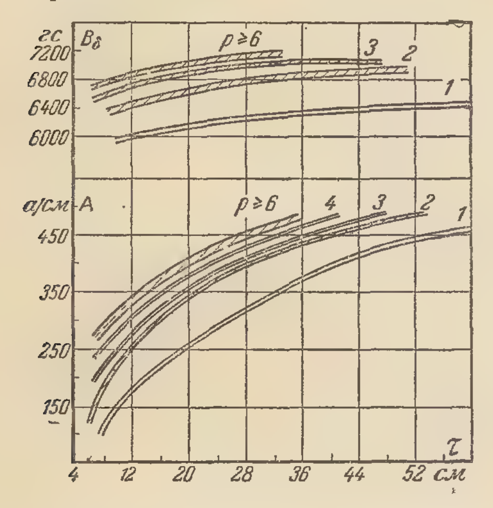


Рис. 13-2. Максимальная индукция в воздушном зазоре B_δ (с учетом уплощения кривой поля) и линейная нагрузка A в зависимости от полюсного деления τ для машин закрытого исполнения с обдувом внешней поверхности корпуса статора или с радиаторным охлаждением.

Для закрытых машин с обдувом внешней поверхности корпуса статора нагрузки A и B_δ рекомендуется выбирать по кривым рис. 13-2. При этом имеются в виду машины на мощности до 10 *квт* при $2p=4$ с изоляцией класса Е и на мощности свыше 10 *квт* при $2p=4$ с изоляцией классов В и F.

Для малых трехфазных двигателей ($P_н \leqslant 600$ *вт*) по соображениям, изложенным ранее (§ 1-1), приходится значительно снижать линейную нагрузку A, больше, чем индукцию B_δ. Они, как правило, имеют закрытое обдуваемое или закрытое исполнение. Нагрузки для них можно выбрать по кривым рис. 13-2, *а*.

Магнитные нагрузки (индукции) в стальных участках магнитной цепи нормальных асинхронных машин при частоте 50 *гц* выбираются согласно табл. 13-1.

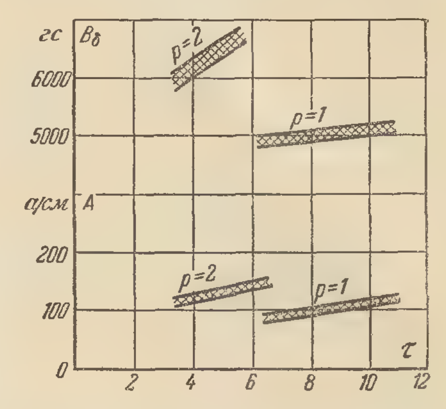


Рис. 13-2а. Максимальная индукция B_δ (с учетом уплощения кривой поля) и линейная нагрузка A в зависимости от τ для малых машин.

Для малых машин ($P_н \leqslant 600$ *вт*) указанные индукции могут выбираться по той же табл. 13-1, но ближе к низшим значениям.

Таблица 13-1

Значения индукций для нормальных асинхронных машин

Участки магнитной цепи	Индукция, *гс*
Ярмо статора	10 000—15 000
Зубцы статора (в наиболее узком сечении при пазах с параллельными стенками)	16 000—21 000
Зубцы статора (в середине, а также при трапецеидальных или грушевидных пазах)	13 000—17 000
Зубцы ротора (в наиболее узком сечении при пазах с параллельными стенками)	16 000—22 000
Зубцы ротора (в середине, а также при трапецеидальных или грушевидных пазах)	14 000—18 000
Ярмо ротора	10 000—16 000

Для зубцов в табл. 13-1 приведены расчетные значения индукции (без учета ответвления потока в пазы). При открытых пазах на статоре для зубцов ротора следует выбирать несколько уменьшенные значения (примерно на 5—7%), чтобы снизить в них пульсационные и поверхностные потери.

Приведенные значения индукций в ярмах принимают в тех случаях, когда ярма имеют неослабленные сечения. Для сечений, ослабленных вследствие наличия выемок, служа-

щих для укрепления пакетов в корпусе статора или на втулке ротора, а также вследствие устройства аксиальных вентиляционных каналов, можно брать индукции до 18 000 *гс*, так как пути с такими сечениями имеют относительно малые длины.

Для тихоходных машин по конструктивным соображениям, а также для серийных машин, когда, например, при $2p = 10 \div 12$ сохраняются одни и те же внешний D_a и внутренний D диаметры статора, приходится брать высоту ярма большей, чем это можно было бы сделать исходя из допустимой индукции.

Если пакеты ротора насаживаются непосредственно на вал, что обычно делается для малополюсных машин ($2p \leqslant 12$) при мощности примерно до $P_н = 400 \div 500$ *квт*, чтобы не иметь внутренней втулки, то индукция в ярме ротора получается часто ниже указанных значений. В то же время для двухполюсных машин иногда приходится идти на значительное увеличение индукции в ярме ротора (до 20 000 *гс* без учета вала), так как высота его в таких машинах, несмотря на то, что для них берутся пониженные значения B_δ (рис. 13-1), все же оказывается относительно небольшой.

Плотности тока для обмоток статора и ротора указываются в § 13-4 и 13-5, где рассматриваются вопросы проектирования этих обмоток.

Приведенные на рис. 13-1, 13-2 и 13-2, *а* значения основных электромагнитных нагрузок A и B_δ относятся к серийным двигателям нормального исполнения, выполняемых с медной обмоткой на статоре. Если для статора применяется алюминиевая обмотка, то значения A и B_δ должны быть снижены примерно на 12—15%. Значения индукции в стальных участках магнитной цепи машины могут быть оставлены на том же уровне, что и при медной обмотке статора.

13-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

На основе сведений, сообщенных в гл. 1, рассмотрим более подробно методы определения главных размеров D и l_δ трехфазных асинхронных двигателей.

По (1-10) находим расчетную мощность

$$P' = \frac{k_E P_н}{\eta \cos \varphi}, \textit{ква}, \qquad (13\text{-}3)$$

где $P_н$ — заданная номинальная мощность, *квт*; k_E — коэффициент по рис. 6-19; значения η и $\cos \varphi$ могут быть предварительно взяты из

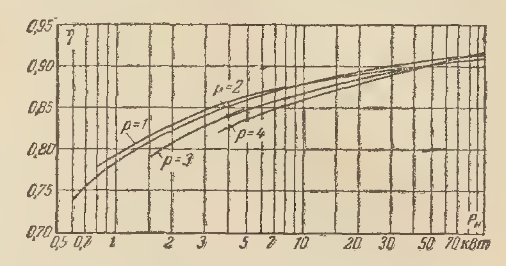


Рис. 13-3. Коэффициент полезного действия η трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором защищенного исполнения в зависимости от номинальной мощности $P_н$.

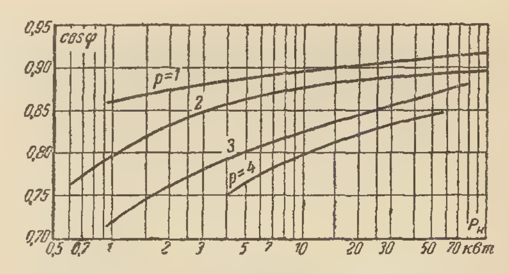


Рис. 13-4. $\cos \varphi$ трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором защищенного исполнения в зависимости от номинальной мощности $P_н$.

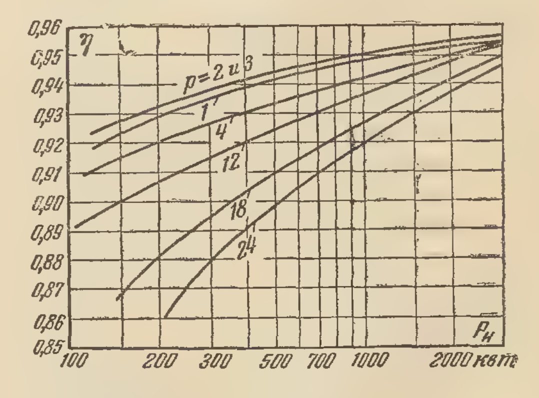


Рис. 13-5. Коэффициент полезного действия η трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами в зависимости от номинальной мощности $P_н$.

Таблица 13-2а

Короткозамкнутые двигатели новых серий А2 и АО2

Мощность, *квт*	Двигатели защищенного исполнения А2								Двигатели закрытого обдуваемого исполнения АО2									
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*																	
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	600	3000	1500	1000	750	600
	Коэффициент полезного действия, %				Коэффициент мощности, cos φ				Коэффициент полезного действия, %					Коэффициент мощности, cos φ				
0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68	—	—	—	—	0,65	—	—
0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72	70	—	—	—	0,76	0,68	—	—
0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	78	74,5	73	—	—	0,86	0,78	0,71	—	—
1,1	—	—	—	—	—	—	—	—	79,5	78	76	—	—	0,87	0,80	0,73	—	—
1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	80,5	80	79	—	—	0,88	0,81	0,75	—	—
2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	83	82,5	81	81	—	0,89	0,83	0,77	0,69	—
3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	84,5	83,5	83	81,5	—	0,89	0,84	0,78	0,70	—
4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	85,5	86	84,5	84	—	0,89	0,85	0,79	0,71	—
5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	87	88	85,5	85	—	0,90	0,86	0,81	0,72	—
7,5	—	—	—	85	—	—	—	0,78	88	88,5	87	86,5	—	0,91	0,87	0,82	0,81	—
10	—	—	87	87	—	—	0,86	0,81	88	89	88	87,5	—	0,89	0,88	0,89	0,83	—
13	—	88,5	88	87,5	—	0,88	0,86	0,82	88,5	88,5	88	89	—	0,90	0,89	0,89	0,84	—
17	88	89,5	89	88,5	0,88	0,88	0,87	0,82	87	89	90	89,5	88	0,90	0,89	0,90	0,85	0,79
22	89	90	89,5	89	0,88	0,88	0,87	0,82	88	90	90,5	90,5	89,5	0,90	0,90	0,90	0,85	0,79
30	90	90,5	90	90	0,90	0,88	0,88	0,84	89	91	91	91	90	0,90	0,91	0,91	0,88	0,82
40	90,5	91	91	91,5	0,90	0,89	0,89	0,84	89	91,5	91,5	91,5	90,5	0,91	0,91	0,91	0,88	0,82
55	91	92	92	92	0,90	0,89	0,89	0,87	90	92,5	92,5	92,5	—	0,92	0,92	0,92	0,90	—
75	92	93	92,5	—	0,90	0,89	0,89	—	90	92,5	92,5	—	—	0,92	0,92	0,92	—	—
100	93	93,5	—	—	0,90	0,90	—	—	91,5	93	—	—	—	0,92	0,92	—	—	—
125	94	—	—	—	0,90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

кривых рис. 13-3—13-6 или из табл. 13-2а—13-4.

В табл. 13-2а приведены значения η и $\cos\varphi$ новых серий асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, причем значения η

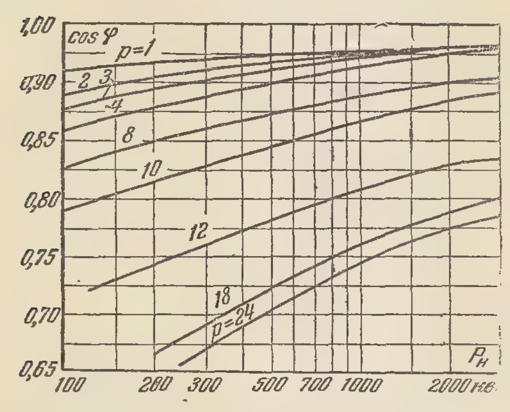


Рис. 13-6. $\cos\varphi$ трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами в зависимости от номинальной мощности $P_н$.

соответствуют $(0{,}6 \div 0{,}7)\ P_н$; при номинальной мощности $P_н$ значения η примерно на 0,3—0,5% ниже указанных.

Таблица 13-2б

Электродвигатели с контактными кольцами (по ГОСТ 186-52)

Мощность, *квт*	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	1500	1000	750	1500	1000	750
	Коэффициент полезного действия, %			Коэффициент мощности $\cos\varphi$		
1,7	—	72,5	—	—	0,72	—
2,8	78,0	75,5	—	0,82	0,74	—
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	80,0	89,5	—	0,88	0,84	—
100	90,5	—	—	0,88	—	—

В табл. 13-2б приведены значения η и $\cos\varphi$ двигателей с контактными кольцами старой серии АК, которая в настоящее время заменяется двигателями новой серии АК2 на мощности, шкала которых приведена в табл. 13-2а. Значения η новых двигателей примерно на 1,2—1,7%, а $\cos\varphi$ на 0,01—0,03 получаются выше указанных в табл. 13-2б.

Шкалы мощностей трехфазных асинхронных двигателей от 0,6 до 100 *квт* (при $2p=4$) приведены в табл. 13-2а и от 100 до 1 000 *квт* (при $2\ p=6$) в табл. 13-3а и 13-3б.

Согласно ГОСТ 9630-61 более мощные двигатели должны изготовляться на мощности, напряжения и скорости вращения, указанные в табл. 13-3в.

В табл. 13-4 приведены значения η и $\cos\varphi$ малых трехфазных асинхронных двигателей.

Короткозамкнутые двигатели с глубокими пазами, или с пазами, утолщенными в нижней части, или с двойной клеткой на роторе имеют значения η почти такие же, как на рис. 13-5, а значения $\cos\varphi$ несколько худшие (на 0,01—0,04), чем по рис. 13-6.

Для определения D и l_δ обратимся к уравнению (1-7) и перепишем его в следующем виде:

$$P' = C' D^2 l_\delta n_1 (AB_\delta); \quad (13\text{-}4)$$

здесь величина $C' = \dfrac{\alpha_\delta k_B k_{o1}}{6{,}1 \cdot 10^{11}}$ для нормальных машин может считаться постоянной. Примем $l_\delta \equiv D$ и $(AB_\delta) \doteq D^\alpha$ при $n_1 = \mathrm{const}$; тогда получим:

$$P' = C'' D^{3+\alpha}. \quad (13\text{-}5)$$

Анализ современных машин, рационально спроектированных, имеющих достаточно высокие технико-экономические характеристики, показывает, что значение α не остается постоянным при изменении D и P'. Если принять некоторое среднее значение для α, то зависимости $D = f(P')$ при различных $2\ p$, построенные в логарифмических масштабах, изобразятся в виде прямых линий (рис. 13-7, 13-8 и 13-8 а). Этими прямыми можно пользоваться для предварительного определения внутреннего диаметра статора D, а следовательно, и $\tau = \pi D / 2\,p$, так как действительные усредненные кривые для выполненных машин мало от них отличаются.

Таблица 13-3а

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором (ГОСТ 9362-60)

Мощность, *квт*	Коэффициент полезного действия, %						Коэффициент мощности					
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*											
	3 000	1 500	1 000	750	600	500	3 000	1 500	1 000	750	600	500
	Номинальное напряжение до 500 в (включительно)											
55	—	—	—	—	89,0	—	—	—	—	—	0,80	—
75	—	—	—	90,0	89,5	—	—	—	—	0,85	0,81	—
100	—	—	90,5	90,5	90,0	—	—	—	0,88	0,86	0,82	—
125	91,5	91,5	91,0	91,0	91,5	—	0,90	0,89	0,88	0,86	0,83	—
160	92,0	92,0	91,5	91,5	91,5	—	0,90	0,89	0,89	0,87	0,84	—
200	92,5	92,5	92,0	92,0	92,0	—	0,91	0,89	0,89	0,88	0,85	—
250	93,0	93,0	92,5	92,5	—	—	0,91	0,89	0,89	0,88	—	—
320	93,5	93,5	93,0	—	—	—	0,91	0,90	0,89	—	—	—
400	94,0	94,0	93,5	—	—	—	0,91	0,90	0,89	—	—	—
	Номинальное напряжение 3000 в											
75	—	—	—	89,0	—	—	—	—	—	0,84	—	—
100	—	89,5	89,0	89,0	89,0	—	—	0,87	0,86	0,84	0,82	—
125	—	90,5	90,0	90,0	90,0	—	—	0,87	0,86	0,84	0,82	—
160	91,0	91,0	90,5	90,0	90,5	90,0	0,88	0,88	0,87	0,84	0,82	0,78
200	91,5	91,5	91,0	91,0	91,0	90,5	0,89	0,89	0,88	0,85	0,82	0,78
250	92,0	92,0	91,5	91,5	91,5	91,0	0,89	0,89	0,88	0,85	0,83	0,79
320	92,5	92,5	92,0	92,0	92,0	91,5	0,89	0,89	0,88	0,85	0,83	0,80
400	93,0	93,0	92,5	92,5	92,5	92,0	0,90	0,90	0,88	0,86	0,84	0,80
500	93,5	93,5	93,0	93,0	93,0	—	0,90	0,90	0,88	0,87	0,85	—
630	94,0	94,0	93,5	93,5	—	—	0,91	0,90	0,88	0,87	—	—
800	94,5	94,5	94,0	—	—	—	0,91	0,90	0,88	—	—	—
1000	94,5	94,5	94,0	—	—	—	0,91	0,90	0,89	—	—	—
1250	—	94,5	—	—	—	—	—	0,90	—	—	—	—
	Номинальное напряжение 6000 в											
200	—	91,0	90,5	90,5	90,5	90,0	—	0,88	0,88	0,83	0,82	0,78
250	—	91,5	91,5	91,5	91,0	90,5	—	0,88	0,88	0,84	0,82	0,78
320	92,0	92,0	92,0	92,0	91,5	91,0	0,90	0,89	0,88	0,85	0,83	0,79
400	92,5	92,5	92,5	92,5	92,0	—	0,90	0,89	0,88	0,85	0,84	—
500	93,0	93,0	93,0	93,0	92,5	—	0,90	0,89	0,88	0,86	0,84	—
630	93,5	93,5	93,5	93,5	—	—	0,91	0,90	0,89	0,86	—	—
800	94,0	94,0	93,5	—	—	—	0,91	0,90	0,89	—	—	—
1000	94,0	94,0	—	—	—	—	0,91	0,90	—	—	—	—

Ранее указывалось, что важным размером для асинхронной машины является внешний диаметр пакетов статора D_a. Его значение при известном D может быть приближенно определено следующим образом.

Из равенства удвоенного потока в ярме статора и потока в воздушном зазоре $2B_c h_c\ (0{,}93\,l) = \alpha_\delta\ \tau l B_\delta$ имеем:

$$h_c \approx 0{,}537\,\frac{B_\delta}{B_c}\,\alpha_\delta\,\tau,\ см. \qquad (13\text{-}6)$$

Если принять $B_\delta = 7\,200 \div 8\,000$ *гс*, $B_c = 12\,500 \div 14\,000$ *гс* и $\alpha_\delta = 0{,}715$, то $h_c = (0{,}24 \div 0{,}20)\,\tau$ или в среднем

$$h_c \approx 0{,}22\tau,\ см. \qquad (13\text{-}7)$$

Глубину паза статора $h_{п1}$ можно предварительно выбрать по рис. 13-9; тогда получим:

$$D_a = D + 2(h_c + h_{п1}). \qquad (13\text{-}8)$$

Для нормальных двигателей мощностью от 1 до 400 *квт* (при $2p = 4$), а с некоторым приближением и для бо̀льших мощностей при предварительном определении D_a можно также руководствоваться соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} &D_a = (1{,}95 \div 1{,}85)\,D \text{ при } 2p = 2;\\ &D_a = (1{,}61 \div 1{,}56)\,D \text{ при } 2p = 4;\\ &D_a = (1{,}44 \div 1{,}41)\,D \text{ при } 2p = 6;\\ &D_a = (1{,}39 \div 1{,}34)\,D \text{ при } 2p = 8 \text{ и } 10. \end{aligned}\right\} \qquad (13\text{-}9)$$

Таблица 13-3б

Электродвигатели с фазным ротором (ГОСТ 9362—60)

Мощность, *квт*	Коэффициент полезного действия, %					Коэффициент мощности				
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*									
	1500	1000	750	600	500	1500	1000	750	600	500
Номинальное напряжение до 500 *в* (включительно)										
55	—	—	—	88,5	—	—	—	—	0,79	—
75	—	—	89,5	89,0	—	—	—	0,84	0,80	—
100	—	90,5	90,0	90,0	—	—	0,86	0,84	0,81	—
125	91,5	91,0	91,0	91,0	—	0,88	0,87	0,85	0,81	—
160	92,0	91,5	91,5	91,5	—	0,89	0,88	0,85	0,81	—
200	92,5	92,0	92,0	92,0	—	0,89	0,89	0,86	0,83	—
250	92,5	92,5	92,5	—	—	0,89	0,89	0,87	—	—
320	93,0	93,0	—	—	—	0,90	0,89	—	—	—
400	93,5	93,5	—	—	—	0,90	0,89	—	—	—
Номинальное напряжение 3 000 *в*										
75	—	—	87,0	—	—	—	—	0,82	—	—
100	89,0	89,0	88,5	88,0	—	0,87	0,86	0,83	0,79	—
125	90,5	90,0	90,0	89,0	—	0,87	0,86	0,83	0,79	—
160	91,0	90,5	90,0	90,0	89,5	0,88	0,87	0,84	0,80	0,76
200	91,0	91,0	91,0	91,0	90,0	0,89	0,88	0,85	0,81	0,76
250	92,0	91,5	91,5	91,5	90,5	0,89	0,88	0,85	0,82	0,79
320	92,5	92,0	92,0	91,5	91,0	0,90	0,88	0,85	0,83	0,79
400	93,0	92,5	92,5	92,0	91,5	0,90	0,88	0,85	0,84	0,79
500	93,5	93,0	93,0	92,5	—	0,90	0,88	0,87	0,85	—
630	94,0	93,5	93,0	—	—	0,90	0,88	0,87	—	—
800	94,5	94,0	—	—	—	0,90	0,88	—	—	—
1000	94,5	94,0	—	—	—	0,90	0,89	—	—	—
1250	94,5	—	—	—	—	0,90	—	—	—	—
Номинальное напряжение 6 000 *в*										
200	91,0	90,5	90,0	90,0	89,5	0,88	0,86	0,81	0,81	0,78
250	91,5	91,0	91,0	90,5	90,0	0,88	0,86	0,83	0,82	0,78
320	92,0	91,5	91,5	91,0	90,5	0,89	0,87	0,84	0,83	0,78
400	92,5	92,0	92,0	91,5	—	0,89	0,88	0,85	0,84	—
500	93,0	92,5	92,0	92,0	—	0,89	0,88	0,86	0,84	—
630	93,5	93,0	93,0	—	—	0,90	0,88	0,86	—	—
800	94,0	93,5	—	—	—	0,90	0,89	—	—	—
1000	94,0	—	—	—	—	0,90	—	—	—	—

Таблица 13-3в

Мощные электродвигатели до 2 000 *квт* (ГОСТ 9630-61)

Ротор фазный							Ротор короткозамкнутый				
Номинальная скорость вращения (синхронная), *об/мин*											
1000	750	600	500	375	300	250	1000	750	600	500	375
Номинальная мощность, *квт*											
—	—	—	—	200	200	—	—	—	—	—	200
—	—	—	—	250	250	250	—	—	—	—	250
—	—	—	—	320	320	320	—	—	—	—	320
—	—	—	400	400	400	400	—	—	—	—	400
—	—	—	500	500	500	500	—	—	—	500	500
—	—	630	630	630	630	630	—	—	630	630	630
—	800	800	800	800	800	800	—	800	800	800	800
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	—	—
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	—	—	—

Примечание. Электродвигатели на все мощности, указанные в настоящей таблице, изготовляются на номинальное напряжение 6 000 *в*, а на мощности 1 600 и 2 000 *квт*, кроме того, и на напряжение 10 000 *в*.

Таблица 13-4

Короткозамкнутые электродвигатели (ГОСТ 8212-56)

Мощность, *вт*	Электродвигатели закрытого исполнения. Скорость вращения (синхронная), *об/мин*: 3 000. Коэффициент полезного действия, %	1 500. Коэффициент полезного действия, %	3 000. Коэффициент мощности	1 500. Коэффициент мощности	Электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения. 3 000. Коэффициент полезного действия, %	1 500. Коэффициент полезного действия, %	3 000. Коэффициент мощности	1 500. Коэффициент мощности
10	—	24	—	0,52	—	—	—	—
18	54	32	0,66	0,52	—	22	—	0,50
30	58	43	0,66	0,64	54	30	0,66	0,50
50	64	52	0,82	0,66	58	43	0,66	0,62
80	68	61	0,83	0,68	58	52	0,84	0,65
120	72	67	0,84	0,70	64	58	0,84	0,72
180	75	71	0,85	0,72	66	62	0,85	0,74
270	77	73	0,86	0,74	69	66	0,85	0,75
400	79	—	0,87	—	72	70	0,85	0,76

Из нормализованных диаметров D_a табл. I-2 или I-3 приложения I выбираем ближайший к полученному по соотношению (13-8) или (13-9). Если эти соотношения дают $D_a>990$ *мм*, то приходится переходить к сборке пакетов из сегментов. В этом случае также следует подобрать D_a по указанной таблице нормализованных диаметров.

Если выбранный нормализованный диаметр заметно отличается от диаметра, найденного по (13-8) или (13-9), то следует после выбора D_a снова определить внутренний диаметр статора по равенству

$$D = D_a - 2(h_c + h_{п1}),\ см \qquad (13\text{-}10)$$

и для этого диаметра определить полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \qquad (13\text{-}11)$$

Из (13-10) и (13-11) с учетом (13-7) получим:

$$D \approx (D_a - 2h_{п1}) \frac{2p}{2p+1{,}38},\ см. \qquad (13\text{-}12)$$

Последнее уравнение показывает, что при данном D_a диаметр D возрастает с увеличением $2p$. Диаметр D при $2p=2$ составляет примерно 60%, при $2p=4$—75%, при $2p=6$—80% и при $2p=8$—85% разности $(D_a-2h_{п1})$. При большем числе полюсов и $D_a \geqslant 58$ *см* диаметр D составляет примерно $(0{,}85\div0{,}92)(D_a-2h_{п1})$.

При проектировании серии машин небольшой мощности, чтобы сократить количество штампов для листов, из которых собираются пакеты статора, оставляют при данном D_a один и тот же диаметр D для нескольких чисел полюсов: например, в серии А2 и АО2 принят один и тот же диаметр D при $D_a=13{,}3$ *см* для $2p=4$ и 6, при $D_a=20{,}8$; 24,3; 29,1; 34,3 *см* для $2p=6$ и 8, при $D_a=39{,}3$; 45,8 *см* для $2p=6$, 8 и 10.

Можно для перехода от D_a к D воспользоваться также соотношениями (13-9).

Далее определяем согласно (1-7) расчетную длину статора по соотношению

$$l_\delta = \frac{6{,}1\cdot10^{11} P'}{\alpha_\delta\, k_B\, k_{01}\, AB_\delta\, D^2 n_1},\ см. \qquad (13\text{-}13)$$

Можно предварительно взять $\alpha_\delta \approx 0{,}715$ и $k_B \approx 1{,}09$, что соответствует насыщению, какое обычно получается в современных асинхронных машинах; только для малых машин ($P_н \leqslant 1{,}5$ *квт*) $\alpha_\delta \approx 0{,}68\div0{,}66$ и $k_B \approx 1{,}1$.

Обмоточный коэффициент для двухслойной обмотки с укороченным шагом $\left(y \approx \frac{5}{6}\tau\right)$, которую и следует выбирать при мощности свыше 7—8 *квт*, может быть предварительно принят равным $k_{01} \approx 0{,}92$; для однослойной обмотки с диаметральным шагом $k_{01} \approx 0{,}96$. Для двухполюсных машин при двухслойной катушечной обмотке, чтобы облег-

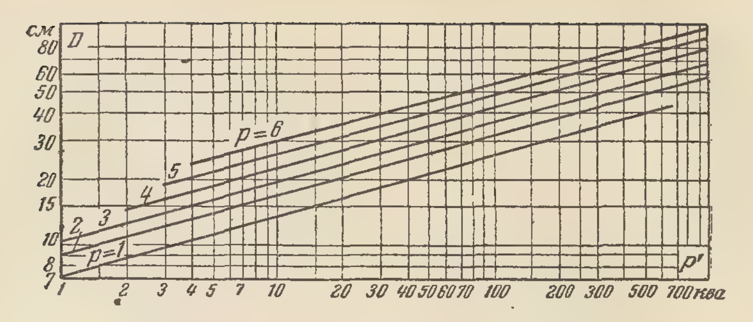


Рис. 13-7. Зависимость $D=f(P')$ при различных p.

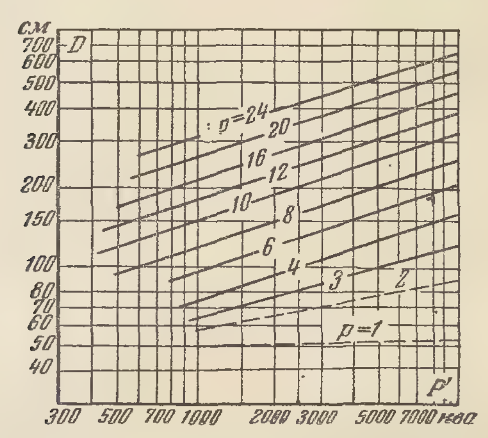


Рис. 13-8. Зависимость $D=f(P')$ при различных p для больших двигателей.

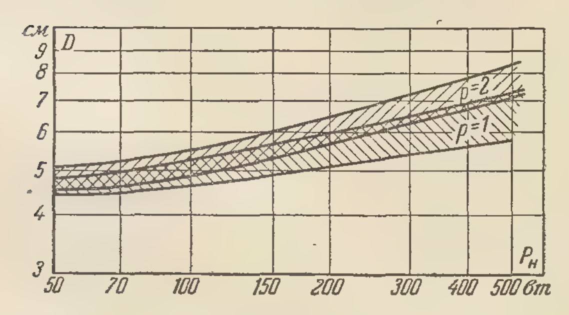


Рис. 13-8а. Зависимость $D=f(P_н)$ для малых двигателей.

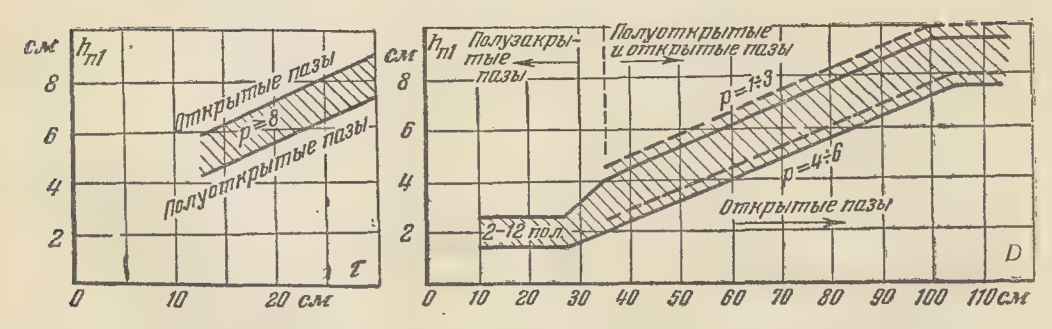


Рис. 13-9. Глубина паза статора для нормальных асинхронных двигателей (штриховые линии — для напряжений 3 000 и 6 000 *в*, сплошные линии — для напряжений до 660 *в*).

чить укладку катушек в пазы, шаг выбирается с большим укорочением [$y=(0{,}55\div 0{,}63)\tau$]; в этом случае $k_{o1}\approx 0{,}71\div 0{,}78$.

Значения A и B_δ берутся из кривых рис. 13-1 или 13-2 для найденного по (13-11) τ.

Полную длину статора по оси предварительно можно принять равной

$$l_1\approx l_\delta+n_{\text{в}}b_{\text{в}},\ \text{см}, \quad (13\text{-}14)$$

где $n_{\text{в}}$ — число радиальных вентиляционных каналов,

$b_{\text{в}}$ — их ширина.

Длина всех пакетов статора равна:

$$l\approx l_\delta\approx l_1-n_{\text{в}}b_{\text{в}},\ \text{см} \quad (13\text{-}15)$$

или

$$l=(n_{\text{в}}+1)\,l_{\text{пак}},\ \text{см}, \quad (13\text{-}16)$$

где $l_{\text{пак}}$ — длина пакета.

Число каналов $n_{\text{в}}$ при их ширине $b_{\text{в}}=1$ *см* выбирается так, чтобы длина пакета $l_{\text{пак}}$ была в пределах 4,0—6,0 *см*. Иногда средние пакеты делаются короче (4—5 *см*), чем крайние (до 6 *см*).

Некоторые заводы выполняют машины при $l_1<40$ *см* с пакетами длиной до 8—10 *см*.

При длине статора, не превышающей 20—23 *см*, можно обойтись без радиальных каналов.

Не применяют их обычно и для короткозамкнутых двигателей с беличьей клеткой на роторе, полученной путем заливки пазов алюминием (при длине ротора до 23 *см*).

При интенсивной аксиальной вентиляции длина пакета статора может быть увеличена до 30—33 *см*.

Если в машинах защищенного исполнения пакет статора непосредственно соприкасается с внутренней поверхностью корпуса статора, как это принято в двигателях новой серии А2, то радиальных каналов не делают, причем длина пакета здесь достигает 24 *см*.

В закрытых двигателях с обдувом внешней поверхности корпуса статора радиальные каналы также не выполняются, так как здесь, как уже указывалось, пакет статора плотно прилегает к внутренней поверхности его корпуса. Здесь длина статора $l_\delta\approx l_1$ выбирается до 32—35 *см* при выполнении аксиальных каналов в роторе и таких же каналов в пакете или (что делается гораздо чаще) в корпусе статора, позволяющих получить необходимую циркуляцию воздуха внутри машины.

По (13-14)—(13-16) устанавливаются значения l, $n_{\text{в}}$, l_1 и значение l_δ, которое может несколько отличаться от ранее найденного по (13-13). Затем определяется отношение

$$\lambda=\frac{l_\delta}{\tau}. \quad (13\text{-}17)$$

Величина λ для нормальных асинхронных двигателей обычно лежит в пределах, указанных на рис. 13-10.

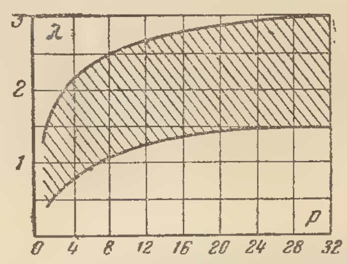


Рис. 13-10. Отношение расчетной длины статора к полюсному делению ($\lambda=l_\delta/\tau$) в зависимости от числа пар полюсов.

Заштрихованная область значений λ соответствует экономичным машинам с удовлетворительными характеристиками.

Теперь можно составить таблицу вариантов (табл. 13-5).

Если рассчитывается серия машин и необходимо при данных диаметрах D_a и D иметь вторую машину (смежный тип) на то же число полюсов и на мощность $\gamma P_{\text{н}}$, то длина для этой машины может быть принята равной γl_δ. Коэффициент нарастания мощности γ обычно выбирается в пределах 1,7—1,25. Для малых мощностей, например от 0,03 до 0,4 *квт*, он колеблется в пределах 1,7—1,37, для бо́льших мощностей, до 100 *квт*, — в пределах 1,35—1,30, для $P_{\text{н}}>100$ *квт* обычно $\gamma\approx\approx 1{,}25$.

Таблица 13-5

Варианты расчета основных размеров машины

№ варианта	D_a	D	τ	A	B_δ	l_1	$n_в \times b_в$	l_δ	$\frac{l_\delta}{\tau}$	$\gamma \frac{l_\delta}{\tau}$ для смежного типа

При расчете серии машин необходимо также иметь в виду, что один и тот же внешний диаметр статора D_a должен быть использован для машин на различные скорости вращения, чтобы можно было для них применить одни и те же корпус статора и подшипниковые щиты. При этом приходится брать различные внутренние диаметры статора D.

Во всех случаях рекомендуется выбирать размеры таким образом, чтобы l_δ/τ и $\gamma \frac{l_\delta}{\tau}$ лежали в пределах, указанных на рис. 13-10.

При проектировании серии машин, когда заданы шкала мощностей и соответствующие им скорости вращения, целесообразно ее разбить на отдельные отрезки таким образом, чтобы в пределах каждого отрезка серии показатель степени α в уравнении (13-5) можно было считать приблизительно постоянным. Для современных машин примерно имеем:

$$\alpha \approx 1 \text{ при } P_н \leqslant 0{,}6 \text{ квт};$$

$$\alpha \approx 0{,}85 \div 0{,}8 \text{ при } P_н \frac{n_1}{1\,500} = 0{,}6 \div 100 \text{ квт};$$

$$\alpha \approx 0{,}5 \div 0{,}45 \text{ при } P_н \frac{n_1}{1\,000} = 100 \div 1\,000 \text{ квт};$$

$$\alpha \approx 0{,}3 \div 0{,}25 \text{ при } P_н \frac{n_1}{1\,000} > 1\,000 \text{ квт}.$$

Если для какого-либо отрезка серии рассчитать среднюю и крайние машины, выбрав для них после расчета ряда вариантов оптимальные, то можно по трем точкам провести среднюю прямую $D=f(P')$ (в логарифмических масштабах аналогично прямым на рис. 13-7 и 13-8). Можно также рассчитать только одну среднюю машину и построить $D=f(P')$, пользуясь указанными значениями α.

В действительности, когда при проектировании серии машин необходимо получить при одном и том же диаметре D две или три мощности (а для тихоходных и больших машин, потребность в которых весьма ограничена, иногда и четыре мощности), прямая $D=f(P')$ превращается в зигзагообразную. Например, необходимо при одном и том же D получить три мощности, тогда для средней из них выбираем D по прямой $D=f(P')$, а для большей и меньшей мощностей, значения которых отмечаем на оси абсцисс, берем тот же диаметр D, но различные длины, выбирая их пропорционально мощности. В этом случае средняя машина является оптимальной, а короткая и более длинная машины по удельному расходу материалов и характеристикам от оптимальных несколько отличаются. Однако различие не получается заметным, так как кривые расхода материалов, $\cos\varphi$, η в зависимости от l_δ/τ проходят вблизи оптимума довольно полого.

Рассмотрим, не определяя точных количественных связей, как сказывается на мощности P' и электромагнитном моменте, приблизительно пропорциональном P'/n_1, переход при $D_a=\text{const}$ от одного числа полюсов к другому. Возьмем, например, четырехполюсную машину. Вылеты лобовых частей ее обмотки статора почти в 2 раза больше, чем в восьмиполюсной машине. Следовательно, при одном и том же корпусе статора длину пакетов восьмиполюсной машины по сравнению с четырехполюсной можно существенно увеличить. Так часто и делают. В данном случае при увеличении числа полюсов длина статорных пакетов возрастает. А так как при $D_a=\text{const}$ возрастает D, то вместе с $D^2 l_\delta$ увеличивается P'/n_1, несмотря на ухудшенные условия охлаждения, зависящие от окружной скорости v, *м/сек*$=\tau$, *см*.

Если воспользоваться теми же рассуждениями в отношении двухполюсной машины, то получим, что здесь при $D_a=\text{const}$ величина $D^2 l_\delta$ заметно уменьшается и значение P'/n_1 будет относительно мало.

13-4. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО СТАТОРА

В гл. 4 были даны указания, которыми следует руководствоваться при выборе статорной обмотки, ее изоляции и формы пазов статора для трехфазных асинхронных двигателей.

Здесь сообщаются дополнительные сведения, относящиеся к проектированию обмотки и пазов статора.

Для малых двигателей при $P_н < 0,6$ *квт* обычно применяется однослойная обмотка при полузакрытых пазах статора, выполняемая из мягких секций путем вкладывания проводников в пазы через их щели.

Для двигателей 1—5-го габаритов ($P_н = 0,6 \div 10$ *квт* при $2p=4$) применяется обычно однослойная шаблонная обмотка с концентрическими катушками (см. рис. 4-4, *а*), за исключением двухполюсных и восьмиполюсных машин, для которых применяется петлевая двухслойная обмотка: при $2p=2$ обмотка выбирается с большим укорочением шага; при $2p=8$ обычно получается $q_1 = 1\frac{1}{2}$.

Для бо̀льших мощностей, как правило, выбирается петлевая двухслойная обмотка с укороченным шагом $y \approx \frac{5}{6}\tau$.

При мощности до 100 *квт* (в четырехполюсном исполнении) обычно применяются для статора всыпная обмотка и полузакрытые пазы. Для бо̀льших мощностей (при $2p=4$ — до 200—250 *квт*, а при $2p=2$ — до 320 *квт*) в большинстве случаев выбираются полуоткрытые пазы и обмотки с подразделенными жесткими секциями из проводников прямоугольного сечения.

Открытые пазы на статоре применяются для двигателей на мощность при $2p=4$ примерно от 250 *квт* и выше; при $2p>4$ открытые пазы можно применять и для меньших мощностей. При открытых пазах обмотка выполняется из жестких секций, что позволяет получить хорошую изоляцию и при этом надежную в работе машину.

Иногда открытые пазы выбираются и для меньших мощностей — для $P_н = 120 \div 200$ *квт* при $2p=4$, чтобы получить более надежную машину для работы в особо тяжелых условиях (например, в шахтах). В этом случае приходится увеличивать воздушный зазор δ для уменьшения пульсационных и поверхностных потерь и мириться с ухудшением $\cos\varphi$ и с некоторым уменьшением к. п. д.

При полузакрытых и полуоткрытых пазах, как отмечалось, обмотка обычно выполняется на напряжение до 500—660 *в*; при напряжениях 3 000, 6 000, 10 000 *в* применяются, как правило открытые пазы.

Как отмечалось, при открытых пазах можно получить более надежную изоляцию для обмотки статора. Но при этом увеличивается коэффициент воздушного зазора k_δ и возрастают поверхностные и пульсационные потери в зубцах ротора. Указанные недостатки можно устранить путем применения «магнитных» клиньев. Такие клинья вставляются в пазы, после того как в них заложены жесткие секции обмотки, и делают пазы как бы полузакрытыми. В Советском Союзе в последние годы успешно проводятся исследовательские работы по созданию магнитных клиньев и их применению.

Число пазов на полюс и фазу q_1 для статора выбирается обычно в пределах 2—5, причем $q_1=2$ берут для малых двигателей и иногда для тихоходных двигателей средней мощности; для больших быстроходных двигателей $q_1=6$ и выше до $q_1=9$ при $2p=2$. Чаще всего для нормальных машин q_1 равно 3 или 4. Следует избегать дробного числа пазов на полюс и фазу; лишь в редких случаях выбирается дробное число со знаменателем, равным 2 или 4. В тихоходных машинах большой мощности высокого напряжения приходится иногда брать $q_1>2$, чтобы не получить чрезмерно большого температурного перепада в пазовой изоляции.

В случае необходимости иметь одинаковые размеры листов статора (следовательно, одинаковые штампы) для различных чисел полюсов выбор q_1 не может быть произвольным, если желательно при каждом числе полюсов устранить дробное q_1. Например, при $2p$, равном 4 и 6, следует при $2p=4$ взять q_1 равным 3 или 6, тогда при $2p$, равном 6, будем иметь q_1 равным 2 или 4; если при $2p=4$ $q_1=6$, то при $2p=6$ получим $q_1=4$, при $2p=8$ $q_1=3$ и при $2p=12$ $q_1=2$.

При полузакрытых пазах, которые, как правило, выбираются тра-

пецеидальной или грушевидной формы, меньшая их ширина лежит обычно в пределах $b=d_2=0,6 \div 0,9$ *см* (см. рис. 6-13, *в*, *г* и *д*). При полуоткрытых и открытых пазах с параллельными стенками ширину паза $b_п$ можно выбирать, руководствуясь табл. 13-6.

Таблица 13-6

Ширина паза $b_п$ в зависимости от τ

τ, *см*	До 660 *в*	3 000 *в*	6 000 *в*
15	0,8—1,0	1,1—1,25	1,25—1,5
25	0,85—1,1	1,2—1,35	1,3—1,6
45	1,0—1,4	1,3—1,6	1,4—1,8

Значения $b_п$ в таблице даны в сантиметрах. Они соответствуют оптимальным значениям в отношении использования зубцового слоя статора и обеспечивают удовлетворительные характеристики двигателя. Возможны отклонения, например, для мощных быстроходных двигателей, для которых при 6 000 *в* ширина паза $b_п$ может быть больше чем 1,8 *см*.

Зубцовое или пазовое деление статора

$$t_1=\frac{\pi D}{Z_1},\ см, \qquad (13\text{-}18)$$

где $Z_1=6\ pq_1$ — число пазов статора.

Количественная связь между шириной паза $b_п$ и пазовым делением t_1 устанавливается следующим соотношением:

$$t_1 \approx (1,8 \div 2,2)\, b_п. \qquad (13\text{-}19)$$

При выборе $b_п$ и t_1 необходимо, чтобы значение индукции $B_{z1\,макс}$ в наименьшем сечении зубца не выходило за пределы, указанные в табл. 13-1.

Число витков w_1 на фазу обмотки статора может быть определено по формуле

$$w_1=\frac{k_E U_1\cdot 10^8}{4k_B\ k_{о1} f_1 \Phi}, \qquad (13\text{-}20)$$

где

$$\Phi=\alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta,\ мкс; \qquad (13\text{-}21)$$

k_E берется из кривой рис. 6-19.

Можно также вначале найти число эффективных проводников на паз по формуле

$$u_п=\frac{At_1 a_1}{I_{1н}}\ (эфф.\ проводников/паз) \qquad (13\text{-}22)$$

($u_п$ должно быть целым числом, а при двухслойной обмотке — четным числом), где a_1 — число параллельных ветвей фазы; $I_{1н}$ — номинальный фазный ток, равный

$$I_{1н}=\frac{P_н\cdot 10^3}{m_1 U_1 \eta \cos\varphi},\ a, \qquad (13\text{-}23)$$

и затем определить число последовательно соединенных витков фазы

$$w_1=pq_1 u_п \frac{1}{a_1}. \qquad (13\text{-}24)$$

При окончательном выборе w_1 значения B_δ и A должны быть сохранены возможно более близкими к тем значениям, которые соответствуют выбранным размерам машины (табл. 13-5).

Как указывалось, мягкие секции, закладываемые в полузакрытые пазы, выполняются из проводников круглого сечения; жесткие секции, закладываемые в открытые или полуоткрытые пазы, — из проводников прямоугольного сечения. При определении размеров сечения проводника сначала выбирается плотность тока $\Delta_с$ *а/мм²*. Она для мягких секций при защищенном исполнении и радиальной вентиляции выбирается в пределах $\Delta_с=5,0 \div 6,5$ *а/мм²*, причем для машин на мощности 1—100 *квт* рекомендуется брать $\Delta_с=4,5 \div 6,0$ *а/мм²*, чтобы не снижать к. п. д. и получить более надежную машину (бо̀льшие значения относятся к коротким машинам при $P_н \leqslant 20$ *квт*). Для малых машин (меньше 0,6 *квт*), имеющих низкие значения A, плотность тока иногда увеличивают до 8,5 *а/мм²*. Однако здесь следует иметь в виду, что при увеличении плотности тока $\Delta_с$ возрастает активное сопротивление обмотки статора r_1, имеющее в малых двигателях относительно большое значение; при этом ухудшаются рабочие и пусковые характеристики двигателя.

Для закрытых обдуваемых машин рекомендуется брать Δ_c на 10—15% меньше указанной.

Для машин мощностью свыше 100 *квт* с радиальной вентиляцией при обычной длине пакета $l_{пак}=4,0\div5,5$ *см* плотность тока при жестких секциях выбирается в пределах $\Delta_c=4,5\div5,5$ *а/мм²*. Здесь также для коротких машин при меньшей длине пакета можно брать бо̀льшие значения. Плотность тока для машин на напряжения 3 000 и 6 000 *в* должна быть снижена до 4,2—3,5 *а/мм²*, а при 10 000 *в* — до 3,5—3,0 *а/мм²*. Электрические потери в обмотке статора составляют существенную часть общих потерь. Поэтому, если желательно повысить к. п. д. двигателя, следует для плотности тока Δ_c выбирать меньшее значение.

После выбора плотности тока Δ_c сечение проводника определяется по формуле

$$s'_c = \frac{I_{1н}}{a_1 n_{эл} \Delta_c}, \text{ мм}^2, \quad (13\text{-}25)$$

где $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном.

Далее по приложению IV выбирается стандартное сечение проводника s_c, ближайшее к s'_c.

При круглых проводниках сечение s_c, число параллельных ветвей фазы a_1, число элементарных проводников $n_{эл}$ выбираются таким образом, чтобы проводники могли быть помещены в паз через его щель (см. § 4-5).

Обычно для двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается $a_1=1$ и диаметр изолированного (эмалированного) провода $d_{из}\leqslant 1,95$ *мм*.

При проводниках прямоугольного сечения необходимо выбирать стандартное сечение s_c, ближайшее к s', вместе с его размерами $a\times b$. Размеры a и b должны быть выбраны так, чтобы можно было уложить проводники в паз при выбранных ширине $b_п$ и толщине витковой и пазовой изоляции (см. § 4-6 и приложение VII). Сечение элементарного проводника не следует брать больше 16—18 *мм²* с размером a по высоте не больше примерно 2,5 *мм* при числе проводников по высоте паза, равном 8 и более.

Задачу проектирования обмотки приходится, следовательно, решать путем совместного выбора a_1, $n_{эл}$, s_c (несколько изменяя иногда ширину паза $b_п$).

Размеры полузакрытого паза трапецеидальной или грушевидной формы определяются при укладке в паз проводников и изоляции с учетом коэффициента заполнения свободной площади паза (см. § 4-5).

Размеры полуоткрытого или открытого паза определяются после укладки в паз проводников и изоляции.

После того как определена глубина паза $h_{п1}$ или высота зубца h_{z1}, можно точно найти высоту ярма статора

$$h_c = 0,5\,(D_a - D - 2h_{z1}), \text{ см}. \quad (13\text{-}26)$$

Следует проверить индукцию в ярме B_c. Она должна лежать в пределах, указанных в табл. 13-1.

13-5. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО РОТОРА

а) **Двигатели с контактными кольцами.** Для роторов с контактными кольцами (фазных) число пазов на полюс и фазу q_2 обычно выбирается на единицу больше или меньше q_1, т. е. $q_2=q_1\pm1$. Соотношение $q_2=q_1\pm2$ встречается в более редких случаях, так как при возрастании различия между q_2 и q_1 повышаются добавочные потери в стали.

Так же как и для статора, не следует выбирать q_2 равным дробному числу; только в отдельных случаях для малых машин или тихоходных иногда приходится брать $q_2=2\frac{1}{2}$ или $1\frac{1}{2}$.

Небольшие двигатели мощностью до 10 *квт* выполняются с катушечной однослойной или двухслойной обмоткой на роторе. При этом выбираются овальные, трапецеидальные или грушевидные полузакрытые пазы с щелью $b_ш=1,5\div2$ *мм*. Обмотка выполняется как всыпная из проводников круглого

сечения. Число фаз берется равным $m_2=3$. Фазы соединяются в звезду или треугольник.

На заводах Советского Союза с успехом применяется для роторов двухслойная петлевая обмотка, по схеме не отличающаяся от таких же обмоток, применяемых для статоров. Она выполняется из прямоугольных проводников относительно небольшого сечения и состоит из жестких секций, закладываемых в открытые пазы. Пазы при этом приходится брать небольшой ширины (3,3—5,6 *мм*), чтобы не иметь заметного возрастания пульсационных и поверхностных потерь в зубцах статора и коэффициента воздушного зазора k_δ.

Такая обмотка применяется для машин до 100 *квт*. Она выполняется с полным или укороченным шагом, при этом прямые части (при выходе из пазов) ее лобовых соединений делаются более длинными, чем для обмоток статора, чтобы улучшить условия охлаждения машины.

Ее преимущество по сравнению с двухслойной стержневой обмоткой, помимо уменьшения большого количества паек на лобовых частях, заключается в том, что она позволяет значительно повысить напряжение на кольцах и, следовательно, снизить ток колец и щеток. Это обстоятельство имеет существенное значение для современных машин, выполняемых без приспособлений для подъема щеток и замыкания колец накоротко.

Число витков w_2 на фазу определяют, задаваясь значением э. д. с. E_2 при неподвижном роторе. Для двигателей до 100 *квт* э. д. с. обычно выбирается в пределах $E_2=40\div230$ *в* (высшие значения при 75—100 *квт*).

После того как установлено число витков w_2 и найден обмоточный коэффициент k_{o2}, можно определить фазный ток ротора I_2 при номинальной нагрузке. Его значение предварительно может быть найдено по формуле

$$I_2 = k_1 I_1 \frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}}, \qquad (13\text{-}27)$$

где, как правило, $m_2=m_1=3$, k_1 — коэффициент, в основном зависящий от $\cos\varphi$; его значение может быть взято по рис. 13-11 для $\cos\varphi$, которым задавались в начале расчета.

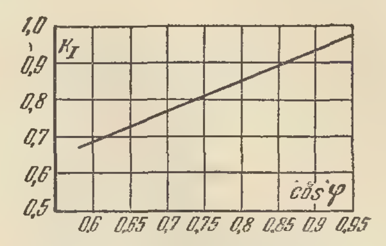


Рис. 13-11. К определению тока ротора.

При катушечной однослойной и двухслойной петлевой обмотках плотность тока можно брать в пределах

$$\Delta_p = 5 \div 6{,}5 \ a/мм^2.$$

Бо́льшие значения выбираются для коротких, хорошо вентилируемых машин защищенного исполнения. При закрытом обдуваемом исполнении плотность тока следует снизить на 10—15%.

Для двигателей с контактными кольцами мощностью выше 100 *квт* (при $2p=4$), как правило, применяется двухслойная волновая обмотка, выполняемая из стержней прямоугольного или (редко) профилированного сечения (§ 4-5). Обмотка выполняется трехфазной при соединении фаз звездой или треугольником. Обычно витки фазы соединяются последовательно при соединении фаз в звезду и только при больших мощностях (на тысячи киловатт) приходится брать на фазу несколько параллельных ветвей и соединять фазы треугольником, чтобы не получить чрезмерного напряжения на кольцах.

Число витков фазы двухслойной волновой обмотки, имеющей a_2 параллельных ветвей при двух стержнях в пазу, определяется по формуле

$$w_2 = 2pq_2 \frac{1}{a_2}.$$

На рис. 13-11 а показаны пределы, в которых обычно лежит напря-

жение $\sqrt{3}U_2 = \sqrt{3}E_2$ на кольцах ротора (при соединении двухслойной волновой обмотки в звезду) нормальных асинхронных двигателей для различных номинальных мощностей. Избегают брать напряжение на кольцах больше 2 000—ра—55—70% площади сечения всех пазов статора, что обусловлено не только меньшим значением н. с. ротора ($F_2 < F_1$), но также повышенной плотностью тока в проводниках обмотки и лучшим коэффициентом заполнения паза ротора.

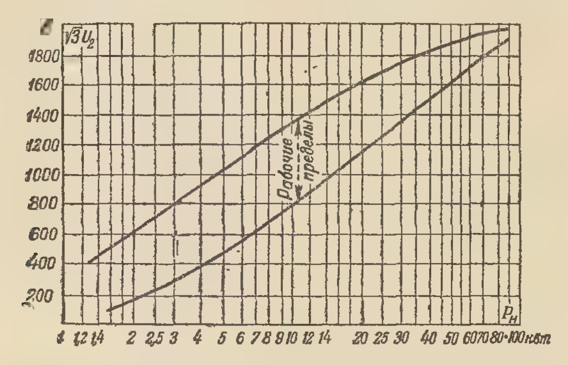


Рис. 13-11а. Напряжение на кольцах ротора нормальных асинхронных двигателей в зависимости от номинальной мощности.

2 200 *в*, при этом ток кольца редко берут больше 1 000 *а* (в исключительных случаях до 2 000 *а*). Имея в виду выполнение пускового реостата, желательно иметь отношение напряжения на кольцах к току кольца по возможности в пределах 1,5—2 *ом*.

Плотность тока для стержней роторной волновой обмотки выбирается в пределах

$$\Delta_р = 4{,}5 \div 5{,}5 \ а/мм^2,$$

причем здесь также для коротких, хорошо вентилируемых машин можно брать высшие значения. Для закрытых обдуваемых машин следует брать $\Delta_р$ на 10—15% меньше.

Размеры паза с параллельными стенками, а также размеры сечения стержня выбирают исходя из допустимой индукции в наименьшем сечении зубца.

Пазы фазного ротора всегда получаются менее глубокими, чем пазы статора. Только для малых быстроходных машин, имеющих небольшое пазовое деление у основания пазов, могут получиться более глубокие роторные пазы. Обычно сечение меди пазовых частей обмотки ротора составляет 70—80% того же сечения обмотки статора, а общая площадь сечения всех пазов ротора

Расчет ярма ротора производится аналогично расчету ярма статора.

б) **Двигатели с короткозамкнутым ротором. 1.** *Выбор числа пазов.* Для короткозамкнутых двигателей при данном числе пазов Z_1 статора необходимо правильно выбрать число пазов Z_2 ротора. При неправильном выборе Z_2 увеличиваются добавочные потери и возникают большие «паразитные» тангенциальные и радиальные силы, которые ухудшают характеристику пускового момента двигателя, создавая в ней провалы, и вызывают шум как при пуске двигателя, так и при его работе.

Возникновение паразитных сил обусловлено наличием высших гармоник в кривых н. с. статора и ротора и зубцовых гармоник в кривой поля. Последние возникают вследствие изменения магнитной проводимости воздушного зазора из-за наличия пазов статора и ротора.

Результаты теоретических и опытных исследований позволяют приближенно установить те соотношения, которыми следует руководствоваться при выборе Z_2.

Тангенциальные силы от высших гармоник поля машины, действующие на ротор, создают асинхронные и синхронные моменты. Асинхрон-

ные моменты возникают аналогично основному вращающему моменту от взаимодействия какой-либо высшей гармоники поля статора и индуктированного ею тока в обмотке ротора. Они ослабляют пусковой момент, а соответствующие им токи в обмотке ротора увеличивают добавочные потери. Чтобы избежать больших асинхронных паразитных моментов, следует выбирать

$$Z_2 \leqslant 1{,}25 Z_1. \qquad (13\text{-}28)$$

Отметим также, что при Z_2, значительно превышающем Z_1, заметно возрастают добавочные потери в стали зубцов.

Целесообразно, особенно при внутреннем диаметре статора D, превышающем 60 *см*, и при открытых пазах статора иметь $Z_2 < Z_1$, но не меньше чем $0{,}7Z_1$, так как при уменьшении Z_2 возрастает дифференциальное рассеяние ротора.

Синхронные моменты возникают от взаимодействия высших гармоник поля статора и ротора, имеющих одинаковые числа полюсов и возбужденных независимо одна от другой. Подобно асинхронным синхронные моменты искажают кривую пускового момента, образуя в ней провалы при одинаковой скорости вращения обеих гармоник. При неодинаковой скорости их вращения синхронный момент изменяется так же, как момент синхронного двигателя, выпавшего из синхронизма. Синхронные моменты вызывают вибрации всего двигателя как при пуске, так и при работе и тем самым обусловливают шум двигателя.

Для того чтобы избавиться от синхронных моментов при пуске (при неподвижном роторе), необходимо соблюдение следующих условий:

$$Z_2 \neq Z_1; \quad Z_2 \neq \frac{1}{2} Z_1; \quad Z_2 \neq 2Z_1;$$

$$Z_2 \neq 6pg. \qquad (13\text{-}29)$$

Здесь и в последующем g — любое положительное целое число.

Чтобы избежать возникновения синхронных моментов при вращении двигателя, должны быть соблюдены неравенства:

$$\left.\begin{aligned} &Z_2 \neq 6pg \pm 2p; \quad Z_2 \neq Z_1 \pm 2p; \\ &Z_2 \neq 2Z_1 \pm 2p; \\ &Z_2 \neq \frac{1}{2} Z_1 \pm p; \quad Z_2 \neq Z_1 \pm p. \end{aligned}\right\} \qquad (13\text{-}30)$$

Здесь знак плюс относится к работе машины двигателем ($s < 1$), знак минус относится к работе машины тормозом ($s > 1$).

Особенно неблагоприятными являются следующие соотношения:

$$Z_2 = Z_1 \text{ и } Z_2 = Z_1 \pm 2p; \qquad (13\text{-}31)$$

их следует избегать в любом случае.

Кроме тангенциальных сил, вызывающих асинхронные и синхронные моменты, возникают периодически изменяющиеся радиальные силы. Эти силы вызывают вибрации ротора и статора и они главным образом превращают машину в источник шума.

Шум машины в большой степени зависит от ее размеров и конструкции, главным образом от способа сочленения пакета статора с его корпусом. Наиболее сильный шум получается при резонансе колебаний, т. е. при совпадении частоты изменения радиальной силы магнитного тяжения и одной из собственных частот системы «статорное кольцо — корпус машины».

Для машин небольшой мощности (примерно до 30 *квт*) собственная частота статорного кольца обычно лежит значительно выше вызывающих шумы частот радиальных сил тяжения, тогда как для машин средних и больших мощностей эти частоты могут совпадать. Поэтому не может быть правил для выбора чисел пазов, в равной мере пригодных как для малых, так и для больших машин.

Для машин небольшой мощности, примерно при $D \leqslant 30$ *см*, не следует брать числа пазов, которые удовлетворяют следующим равенствам:

$$\left.\begin{aligned} &|Z_1 - Z_2| = 0,\ 1,\ 2; \\ &|Z_1 - Z_2| = p,\ p \pm 1; \\ &|Z_1 - Z_2| = 2p,\ 2p \pm 1;\ 2p + 2; \end{aligned}\right\} \qquad (13\text{-}32а)$$

$$|Z_1 - Z_2| = 3p. \quad \Big\} \quad (13\text{-}32а)$$

Для машин средних и больших мощностей, примерно при $D>30$ *см*, не рекомендуется брать числа пазов, удовлетворяющие следующим равенствам:

$$\left.\begin{aligned} &|Z_1 - Z_2| = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4;\\ &|Z_1 - Z_2| = p,\ p \pm 1;\\ &|Z_1 - Z_2| = 2p,\quad 2p \pm 1;\\ &\quad 2p \pm 2,\ 2p \pm 3,\ 2p \pm 4;\\ &|Z_1 - Z_2| = 3p. \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}32б)$$

Кроме того, анализ зубцовых гармоник поля машины и опыт [Л. 59] показывают, что числа пазов следует также выбирать в зависимости от числа параллельных ветвей a_1 обмотки статора. Если требуется $a_1>$ >1, то рекомендуется выбирать Z_1, Z_2 и a_1 так, чтобы эти числа не удовлетворяли следующим равенствам.

$$\left.\begin{aligned} &|Z_1 - Z_2| = \left|\frac{p}{a_1} \pm p \pm 1\right|\\ &(a_1 \text{ — нечетное число});\\ &|Z_1 - Z_2| = \left|\frac{2p}{a_1} \pm p \pm 1\right|\\ &(a_1 \text{ — четное число}). \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}32в)$$

При двухслойной обмотке с укороченным шагом и $a_1=2$ также не рекомендуются такие числа Z_1 и Z_2, которые удовлетворяли бы равенствам:

$$\left.\begin{aligned} &Z_1 - Z_2 = 3p \pm 1;\\ &Z_1 - Z_2 = p \pm 1. \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}32г)$$

Для уменьшения паразитных тангенциальных и радиальных сил часто применяется скос пазов ротора или статора, так как при этом удается значительно снизить амплитуды гармоник высоких порядков, близких к порядку зубцовых гармоник. Обычно скос пазов b_c делается на одно пазовое деление статора (первичной части машины):

$$b_c = \frac{\pi D}{Z_1},\ см. \qquad (13\text{-}33)$$

При скошенных пазах предоставляется более широкий выбор числа пазов Z_2. Однако скос пазов приводит к увеличению индуктивных сопротивлений рассеяния и, следовательно, к понижению максимального вращающего момента двигателя и его $\cos\varphi$. Поэтому не следует выбирать величину b_c чрезмерной (см. § 13-7, *д*).

Следует также отметить, что скос пазов при литой алюминиевой обмотке на роторе приводит к увеличению добавочных потерь от «поперечных» токов, наведенных высшими гармониками поля и замыкающихся по стали ротора от стержня к стержню. Вследствие этого для машин с полуоткрытыми или открытыми пазами на статоре не рекомендуется выполнять ротор со скошенными пазами, если для него применяется литая алюминиевая обмотка.

Рассматривая условия возникновения паразитных сил, убеждаемся, что для двухполюсных машин ($2p=$ $=2$) не существует благоприятных соотношений между Z_2 и Z_1. Здесь любые числа пазов ротора вызывают те или другие паразитные силы. Поэтому приходится при $2p=2$ выбирать Z_2 в зависимости от поставленных условий. Если при пуске допусти́м шум, вызванный вибрационными силами, то можно взять Z_2 равным нечетному числу. Если машина не должна работать в режиме тормоза (при $s>1$), то при $Z_1=24$ можно брать Z_2 равным 16, 22, 28, к которым при Z_1, равном 36 и 48, прибавляются еще числа 40, 46, 52, 58. Для двухполюсных машин рекомендуется выбирать скошенные пазы.

Для четырехполюсных машин совершенно безупречных чисел пазов тоже нет. Однако здесь имеется возможность подбором Z_2 избавиться от наиболее интенсивных паразитных сил.

При числах полюсов, превышающих 12—14 и обычно соответствующих машинам с относительно большими диаметром D и воздушным зазором δ, выбор соотношения чисел пазов Z_2 и Z_1 упрощается. Рекомендуется при выборе числа пазов ротора Z_2 руководствоваться табл. 13-7, заимствованной из рас-

Таблица 13-7

Рекомендуемые числа пазов для короткозамкнутых двигателей

Число полюсов 2p	Число пазов статора	Прямые пазы	Скошенные пазы
		а) Двигатели для обычных условий работы	
2	18	—	26
	24	[16] 32	(18), (30), 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, (24), 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	59
4	24	[32]	16, [20], 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, [32], 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, [38], (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (39), 40, [44], 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 42, [48]	47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	34, 62, [64]	35, 61, 63, 65,
	72	58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 63, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 108, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 82, 98, 106, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
14	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	126	106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96	84, 86, 106, 108, 116, 118, 120	90, 102
	144	122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	138, 150
		б) Двигатели для практически бесшумной работы	
2	24		16, (12), (30), (32)
	30		(18), 20, 22, (24), (36), 38, 40
4	36		(24), 26, 28, 44, 46, (48)
	48		(34), 36, 38, 40, 55, 58, 60, 62, 64
6	54		42, 44, 64, 66, 68
	72		56, 58, 60, 62, 82, 84, 86, 88, 90
8	72		58, 86, 88, 90
	96		78, 80, 82, 110, 112, 114

Примечания: 1. Числа пазов, заключенные в круглые скобки, дают ухудшенные пусковые характеристики; числа пазов, заключенные в квадратные скобки, не следует применять для машин, работающих в режиме тормоза.

2. При открытых пазах статора рекомендуется соблюдать соотношение $0{,}82Z_1 \leqslant Z_2 \leqslant 1{,}25Z_1$.

3. При тяжелых условиях пуска рекомендуется выбирать $Z_2 < Z_1$.

четных материалов ленинградского завода «Электросила».

Выбор формы пазов для короткозамкнутого ротора зависит от мощности и числа полюсов двигателя, а также от тех требований, которые предъявляются к его пусковым характеристикам.

2. *Роторы нормальных двигателей до 100 квт.* Для нормальных машин малой мощности (до 1 *квт*) обычно выбираются полузакрытые

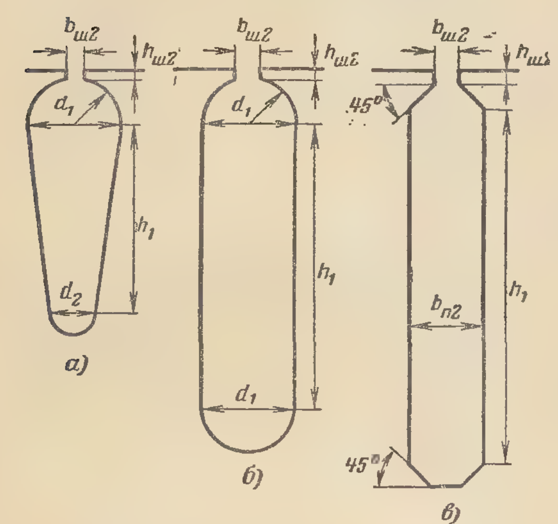


Рис. 13-12. Пазы для литой алюминиевой обмотки.

круглые или овальные пазы с шириной открытия около 1 *мм* и иногда закрытые с толщиной мостика перекрытия 0,3—0,5 *мм*. Медные стержни при круглых пазах в настоящее время применяются крайне редко (иногда для малых машин до 100—200 *вт*). Как правило, при круглых и овальных пазах применяется обмотка, полученная путем заливки пазов алюминием.

Для машин мощностью от 0,6 до 100 *квт* (при $2p=4$) применяется алюминиевая обмотка при полузакрытых пазах, показанных на рис. 13-12. Пазы по рис. 13-12, *а* выбираются для машин мощностью примерно до 4—7 *квт* со следующими размерами: $b_{ш2}=1$ *мм*; $h_{ш2}=0{,}5\div1{,}0$ *мм*; $d_1/d_2=6{,}5\div7{,}5/4\div6$ *мм*; $h_1=10\div20$ *мм*. Для большей мощности пазы выбираются по рис. 13-12, *б* или *в*, причем в последние годы обычно по рис. 13-12, *в* с размерами: $b_{ш2}=1{,}5$ *мм*; $h_{ш2}=0{,}5\div1{,}5$ *мм*; $b_{п2}=3{,}5\div6$ *мм*; $h_1=25\div45$ *мм* (размер $h_{ш2}$ для двухполюсных машин на 75 и 100 *квт* часто увеличивают до 2,5 *мм*; размер h_1 берется тем больше, чем больше мощность машины и ее число полюсов).

При заливке пазов алюминием можно принять сечение стержня s_c равным сечению паза. Сечение паза по рис. 13-12, *а*

$$S_п=s_c=\frac{\pi}{8}\left(d_1^2+d_2^2\right)+h_1\frac{d_1+d_2}{2},\ мм^2. \quad (13\text{-}34)$$

По этой же формуле при $d_1=d_2$ определяется сечение паза по рис. 13-12, *б*. Сечение паза по рис. 13-12, *в*

$$S_п=s_c=h_1b_{п2}+0{,}5\left(b_{п2}^2-b_{ш2}^2\right),\ мм^2. \quad (13\text{-}35)$$

Для определения сечения стержня необходимо найти в нем ток $I_c=I_2$. Последний находится по следующей формуле:

$$I_c=I_2=k_I I_{1н}\frac{m_1w_1k_{o1}}{m_2w_2k_{o2}}=k_I I_{1н}\frac{6w_1k_{o1}}{Z_2},\ а, \quad (13\text{-}36)$$

где k_I можно взять в зависимости от $\cos\varphi$ из кривой рис. 13-11.

Для малых двигателей ($P_н\leqslant1\,000$ *вт*) предварительное значение тока ротора можно также определить по формуле

$$I_c=I_2\approx\frac{2w_1k_{o1}}{U_1Z_2}\frac{P_н}{\eta},\ а, \quad (13\text{-}36а)$$

где $P_н$ — номинальная мощность, *вт*;

η — к. п. д., значением которого задавались в начале расчета.

Сечение стержня

$$s_c=\frac{I_c}{\Delta_c},\ мм^2, \quad (13\text{-}37)$$

где Δ_c — плотность тока, *а/мм²*.

При круглых пазах для медных стержней можно брать $\Delta_c=5{,}5\div8$ *а/мм²*. Низшие значения относятся к закрытым обдуваемым машинам.

Плотность тока в стержне литой алюминиевой обмотки выбирается примерно в 2 раза меньше, чем для медной обмотки, чтобы в обоих случаях иметь приблизительно одинаковые электрические потери. Для алюминиевой обмотки можно брать $\Delta_c = 2{,}2 \div 4{,}5$ *а/мм²*. Здесь низшие значения относятся к малым двигателям, а также к закрытым обдуваемым; высшие значения — к двигателям примерно при $P_н \geqslant 40$ *квт*. Рекомендуется выбирать $\Delta_c = 3 \div 4$ *а/мм²*.

От сопротивления беличьей клетки, которое определяется в основном сопротивлением стержней, зависит, как известно, начальный вращающий момент двигателя. Чтобы этот момент был достаточным, плотность тока Δ_c не должна быть слишком малой. С другой стороны, не следует для нормальных двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы, брать чрезмерно высокие значения для Δ_c, чтобы не снижать к. п. д. и не иметь больших потерь в роторе, что особенно следует иметь в виду в случае закрытых машин, где от этих потерь зависит нагрев обмотки статора.

Ток в короткозамыкающем кольце по (7-10)

$$I_к = I_c \frac{1}{2\sin\frac{\pi p}{Z_2}} \approx I_c \frac{1}{2\frac{\pi p}{Z_2}}, \ a. \quad (13\text{-}38)$$

Сечение короткозамыкающего кольца

$$s_к = \frac{I_к}{\Delta_к}, \ мм^2. \quad (13\text{-}39)$$

Плотность тока $\Delta_к$ для кольца обычно меньше чем Δ_c на 20—35%:

$$\Delta_к \approx (0{,}80 \div 0{,}65)\,\Delta_c. \quad (13\text{-}40)$$

3. *Глубокие пазы.* Для двигателей при $P_н \geqslant 100$ *квт* и $2p \geqslant 6$ обычно применяются роторы с глубокими пазами, позволяющие получить удовлетворительные пусковые характеристики.

В глубокие пазы помещаются высокие медные стержни, которые на торцах присоединяются к медным короткозамыкающим кольцам. Сечения стержня и короткозамыкающего кольца можно определить по (13-37) и (13-39), предварительно определив токи I_c и $I_к$ по (13-36) и (13-38) и выбрав плотности тока Δ_c и $\Delta_к$.

Плотность тока для стержня обычно выбирается в пределах $\Delta_c = 5{,}5 \div 7{,}5$ *а/мм²*. При выборе Δ_c необходимо считаться с условиями охлаждения двигателя при его нормальной работе. При тяжелых условиях пуска, чему соответствует большой маховой момент приводимого во вращение механизма, высокая конечная скорость вращения, а следовательно, большое время разбега, следует брать плотность тока Δ_c не больше 6,5—7 *а/мм²*. Опыт показал, что при тяжелых условиях пуска верхние части стержней за время разбега сильно нагреваются (больше, чем нижние части стержней) и в них возникают местные механические напряжения, которые иногда приводят к деформациям стержней и нарушению их соединений с короткозамыкающими кольцами.

Для больших тихоходных машин защищенной или открытой конструкции можно брать высшие значения Δ_c. Плотность тока $\Delta_к$ для колец рекомендуется выбирать по (13-40).

Размеры стержня, а следовательно, и размеры паза иногда приходится выбирать исходя из заданных значений начального пускового момента $M_{нач}$ и начального пускового тока $I_{нач}$. Задача в этом случае может быть решена аналитически или графически при помощи диаграмм тока *. Ее можно также решить путем подбора размеров паза.

Высота паза выбирается равной $h_п = 30 \div 50$ *мм*, причем высшие значения относятся к большим тихоходным машинам. Для небольших двигателей, у которых ротор непосредственно насаживается на вал, при выборе $h_п$ необходимо считаться с размерами ротора: $h_п$ следует выбирать так, чтобы не получилось чрезмерно ослабленное ярмо рото-

* См. § 13-7, в, п. 1 и пример расчета приведенный в конце данной главы, а также СЭТ, т. VI, разд. 37, Н.

ра. Иногда в этом случае применяются наклонные пазы (рис. 4-36, *б*, справа).

Выбрав $h_п$, определяют ширину паза

$$b_п \approx \frac{s_c}{h_п},\ мм. \qquad (13\text{-}41)$$

Ширина паза обычно лежит в пределах $b_п = 3 \div 6$ *мм*.

В дальнейшем при расчете $M_{нач}$ и $I_{нач}$ можно внести соответствующие изменения размеров $h_п$ и $b_п$, чтобы получить заданные значения $M_{нач}$ и $I_{нач}$ или близкие к ним.

Следует иметь в виду, что увеличение глубины паза хотя и приводит к увеличению $M_{нач}$ и уменьшению $I_{нач}$, но вместе с этим ведет к ухудшению $\cos\varphi$ при нормальной работе двигателя и к понижению его способности к перегрузке.

4. *Двойная клетка.* Короткозамкнутые двигатели для улучшения их пусковых характеристик выполняются также с двойной клеткой на роторе, изобретенной в 1893 г. М. О. Доливо-Добровольским.

Обычные формы пазов ротора для двойной клетки были показаны на рис. 4-36, *г*. Размеры их выбираются в зависимости от заданных значений $M_{нач}$ и $I_{нач}$, причем здесь, так же как при глубоких пазах, приходится идти на ухудшение $\cos\varphi$ тем большее, чем больше должно быть отношение

$$\varkappa_п = \frac{m_{нач}}{i_{нач}}, \qquad (13\text{-}42)$$

где $m_{нач} = M_{нач}/M_н$ — кратность начального момента;

$i_{нач} = I_{нач}/I_н$ — кратность начального тока.

Величину $\varkappa_п$ будем называть коэффициентом эффективности пуска; называют ее также добротностью пуска. При двойной клетке может быть получено большое значение $\varkappa_п$, недостижимое практически при других выполнениях роторной обмотки.

Определение размеров пазов, стержней и короткозамыкающих колец двойной клетки рассматривается в § 13-7, *в*, п. 2 вместе с определением ее параметров.

Двойная клетка обычно применяется для двигателей, от которых требуются высокий начальный момент и соответственно высокое значение коэффициента $\varkappa_п$.

Отметим, что выполнение двойной клетки с технологической стороны связано с некоторыми затруднениями и требует особенно тщательного выполнения соединений верхних стержней с короткозамыкающими кольцами.

5. *Бутылочные (колбообразные) пазы.* Для роторов быстроходных

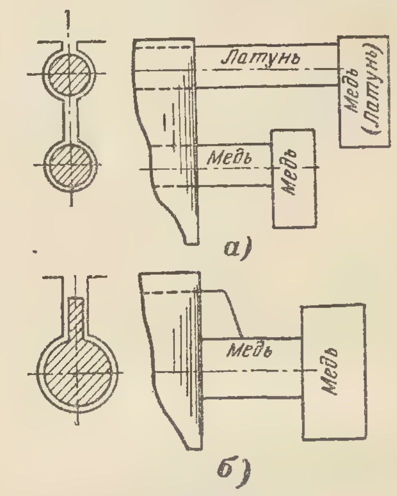


Рис. 13-13. Пазы при двойной клетке и бутылочные.

двигателей (обычно при $2p = 4$, но иногда и при $2p$, равном 2 или 6, а для мощных двигателей и при $2p$, равном 8 или 10) в последние годы применяются пазы с утолщенной нижней частью в виде показанного на рис. 13-13, *б*. Такие пазы применяются на заводах Советского Союза; здесь они получили название бутылочных. На рис. 13-13 для сопоставления схематически показаны пазы и лобовые части двойной клетки и одинарной клетки со стержнями бутылочного профиля.

Как видно на рис. 13-13, *б*, верхние части стержней при выходе их из пазов срезаются, нижние их части вставляются в круглые отверстия короткозамыкающих медных колец. При таком сравнительно простом исполнении клетки она обычно получается достаточно надежной. Кро-

ме того, при одном и том же увеличении активного сопротивления стержней ротора вследствие вытеснения тока бутылочные пазы получаются значительно менее глубокими, чем пазы с параллельными стенками.

Отметим также технологические преимущества клетки из стержней указанного профиля по сравнению с двойной клеткой [Л. 104]:

1) отпадает работа по изготовлению верхней клетки и связанная с ней сложная пайка стержней из латуни или другого металла высокого сопротивления, часто содержащего алюминий, с короткозамыкающими кольцами, обычно выполняемыми из меди;

2) отпадает наружная обработка короткозамыкающих колец, что уменьшает отходы меди;

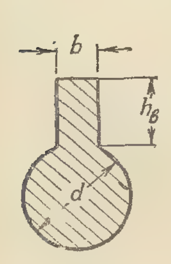
3) относительно простая форма паза (открытая прорезь) позволяет применить компаундный штамп, что при двухклеточных роторах вследствие малой ширины прорези между верхней и нижней частями паза было практически невозможно.

Медь бутылочного профиля изготовляется сначала в виде прессованной заготовки с грубыми допусками, а затем протягивается до точных размеров с допуском 0,3 *мм*.

Относительная сложность изготовления профильной меди требует максимальной унификации размеров сечений. Так, например, для ряда двигателей на заводе «Электросила» применялись вместо двойной клетки бутылочные пазы с четырьмя размерами сечения меди, указанными в табл. 13-8, что позволило заменить восемь размеров круглой меди и восемь размеров круглой латуни.

Таблица 13-8

Размеры меди специального (бутылочного) профиля, применяемые на заводе «Электросила»



№	*d, мм*	*b, мм*	$h_в$, *мм*
1	10,5	4,0	12
2	12,0	4,0	12
3	18,0	5,0	12
4	20,0	5,5	12

Рекомендуется несколько округлить переходы от круглой части сечения к прямоугольной (рис. 13-14), что должно облегчить изготовление стержня при его запрессовке и протягивании.

Выбор размеров бутылочного паза и стержня соответствующего профиля рассматривается в § 13-7, в, п. 3.

6. *Клинообразные пазы.* Клинообразные пазы (рис. 4-36, *в*) также могут найти себе применение для короткозамкнутых роторов в тех же

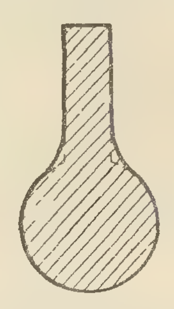


Рис. 13-14. Рекомендуемый профиль меди для бутылочного паза.

случаях, что и бутылочные пазы. Здесь эффект вытеснения тока сказывается несколько менее резко, чем при бутылочных пазах, однако по сравнению с последними клинообразные пазы позволяют применять более простые по изготовлению стержни. Определение размеров таких пазов и соответствующих им по сечению стержней рассматривается в § 13-7, в, п. 4.

7. *Ротор с массивными стальными кольцами, охватывающими медные короткозамыкающие кольца.* Короткозамкнутые двигатели при $2p=2$ ($n_1=3\,000$ *об/мин* при $f_1=50$ *гц*) на мощности, превышающие 130 *квт*, иногда приходится выполнять с круглыми полузакрытыми пазами (при размере $h_{ш2}$ до 4—5 *мм*), так как при глубоких, бутылочных, клинообразных пазах и при двойной клетке высота ярма ротора таких двигателей оказывается недостаточной.

В этом случае медные короткозамыкающие кольца беличьей клетки охватываются с обеих сторон массивными стальными кольцами. Они, во-первых, служат в качестве бандажей для медных колец, окружная скорость которых достигает 70—80 *м/сек*, во-вторых, улучшают пусковые характеристики двигателя.

Последнее обусловлено возникновением в стальных кольцах относительно больших магнитных потерь при большой частоте тока

ротора, что приводит к увеличению активного сопротивления роторной цепи. Можно себе представить, что в роторную цепь как бы включен трансформатор, вторичными контурами которого являются контуры вихревых токов в кольцах.

По мере уменьшения частоты тока ротора «трансформаторная связь» медного кольца с массивными стальными ослабляется, что соответствует уменьшению активного сопротивления роторной цепи.

Расчет параметров для рассматриваемого ротора затруднителен вследствие сложной формы медных и стальных колец. Как показывает опыт, активное сопротивление роторной цепи при пуске ($s=1$) таких двигателей увеличивается примерно в 1,5—2 раза, что при начальном пусковом токе, превышающем номинальный в 6—7 раз, во многих случаях оказывается достаточным.

в) **Ярмо ротора.** В отношении выбора размеров ярма ротора нужно сделать дополнительные замечания.

При внешних диаметрах статора D_a до 740—850 *мм* роторные пакеты обычно непосредственно насаживаются на вал (без промежуточной втулки). В этом случае при $2p \geqslant 4$ высота ярма ротора всегда получается достаточной, для того чтобы индукция не превышала допустимой, даже при наличии осевых каналов в роторе, которые должна иметь машина, если она выполняется с радиальными каналами в роторе и статоре.

При указанных диаметрах и при $2p=8\div12$ высота ярма $h_р$ часто получается больше, чем это нужно было бы по допустимой индукции $B_р$; однако получающийся здесь некоторый излишек в расходовании электротехнической стали обычно окупается удешевлением изготовления ротора.

Если диаметр ротора достигает больших значений и требуется применение внутренней втулки или крестовины, что мы имеем для мощных тихоходных машин, то высоту ярма ротора следует выбирать, так же как и ярма статора, по допустимой индукции.

Длина ротора l_2 выбирается обычно больше длины статора на 4—10 *мм*.

13-6. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

При выборе воздушного зазора δ обычно стремятся получить для него возможно малое значение, чтобы иметь небольшой ток холостого хода, от которого главным образом зависит $\cos\varphi$ двигателя. При этом приходится считаться с необходимостью получить надежную машину, изготовление и установка которой не вызывают больших затруднений.

Значение δ зависит в основном от внутреннего диаметра статора D, диаметра и длины вала между подшипниками: от диаметра D зависят неизбежные производственные отклонения (допуски) при механической обработке подшипниковых щитов и корпуса статора, при штамповке листов и сборке их в пакеты статора и ротора; от диаметра и длины вала между подшипниками зависит прогиб вала.

При выборе δ обращаются к данным рационально спроектированных и построенных машин, эксплуатация которых подтвердила их высокие технико-экономические характеристики и надежность в работе. Сопоставление этих данных позволило составить следующие эмпирические формулы:

для небольших машин мощностью $P_н \leqslant 20$ *квт* при $2p=4\div10$

$$\delta \approx 0{,}25+\frac{D}{1\,000},\ мм; \qquad (13\text{-}43а)$$

при $2p=2$

$$\delta \approx 0{,}3+\frac{D}{666},\ мм; \qquad (13\text{-}43б)$$

для средних и больших машин мощностью $P_н>20$ *квт* при $2p=2\div\div16$

$$\delta \approx \frac{D}{1\,200}\left(1+\frac{9}{2p}\right),\ мм; \qquad (13\text{-}44)$$

для тихоходных машин при $2p==18\div56$

$$\delta \approx \frac{D}{1\,000}+0{,}6\ мм \qquad (13\text{-}45)$$

Здесь внутренний диаметр статора D должен быть взят в миллиметрах; полученное значение δ во втором знаке после запятой обычно округляют до нуля или до 5. Формулы составлены для нормальных отношений l/τ.

Для короткозамкнутых двигателей с литой алюминиевой обмоткой

ротора при $2p=2$ и $D=140\div300$ *мм* зазор рекомендуется взять больше, чем дают формулы (13-43б) и (13-44), примерно в 1,3 раза, чтобы уменьшить добавочные потери при холостом ходе и при нагрузке.

Рекомендуемые значения мало отличаются от значений δ, принятых для современных серий машин, изготовляемых на заводах Советского Союза.

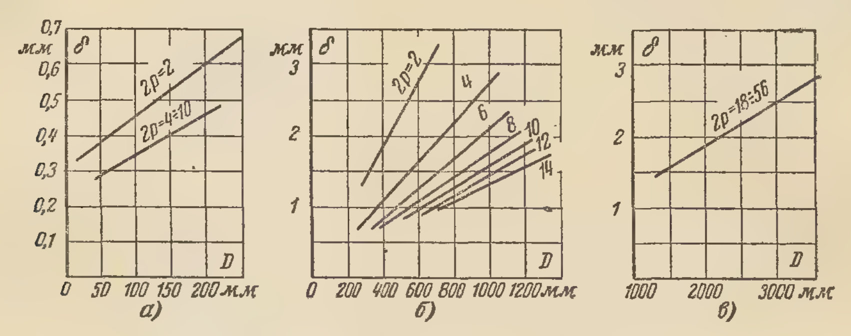


Рис. 13-15. Кривые для выбора δ в зависимости от D и $2p$.
а — для $P_н \leqslant 20$ *квт*; *б* — для $P > 20$ *квт*; *в* — тихоходные машины.

В соответствии с приведенными формулами на рис. 13-15 построены кривые, которыми можно пользоваться при выборе δ.

Можно также определить δ по приближенной эмпирической формуле

$$\delta \approx 3\left(4+0,7\sqrt{Dl_1}\right)10^{-2}, \text{ мм}, \quad (13\text{-}46)$$

где D — диаметр статора, *см*;

l_1 — его полная длина, *см*.

Для малых двигателей ($P_н < 0,8$ *квт*) обычно $\delta = 0,3\div0,25$ *мм*.

Иногда двигатели, предназначенные для работы в тяжелых условиях (например, в условиях вибрации, резких перегрузок), выполняются с увеличенным зазором. Зазор δ увеличивают в 1,3—1,5 раза по сравнению с указанными нормальными его значениями, что приводит к снижению $\cos\varphi$ на 0,04—0,06.

13-7. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

а) Общие замечания. Теория асинхронной машины, как известно, основана на ее аналогии с трансформатором.

Значения величин и зависимости между ними, характеризующие работу вращающейся машины, можно получить, заменив ее неподвижной машиной, работающей как трансформатор. При этом активное сопротивление вторичной цепи машины должно быть взято равным r_2/s, где r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки, а s — скольжение.

Приведя параметры вторичной цепи к первичной, для асинхронной машины, так же как для трансформатора, можно построить схему замещения в виде изображенной на рис. 13-16. Параметры этой схемы называются также параметрами асинхронной машины.

Расчетные формулы для определения r_1, r_2', x_1 и x_2' были приведены ранее в гл. 7. Параметры ветви намагничивания r_{12} и x_{12} могут быть с известным приближением определены по следующим формулам:

$$r_{12} \approx \frac{P_{c1}}{m_1 I_\mu^2}, \text{ ом}; \quad (13\text{-}47)$$

$$x_{12} \approx \frac{U_1 - I_\mu x_1}{I_\mu}, \text{ ом}, \quad (13\text{-}48)$$

где P_{c1} — основные потери в стали статора, *вт*;

I_μ — намагничивающий ток, *а*;

U_1 — номинальное фазное напряжение, *в*.

Для нормальной машины можно принять, что ее параметры остаются постоянными при изменении режима работы от холостого хода до номинальной нагрузки.

При критическом скольжении $s_к$, соответствующем максимальному вращающему моменту, токи I_1 и I_2'

примерно в 2,5—4 раза больше номинальных. При этом начинает сказываться насыщение зубцов от полей рассеяния и, следовательно, x_1 и x_2' уменьшаются.

При $s > s_к$ на параметры r_2' и x_2' оказывает влияние вытеснение тока в стержнях роторной обмотки, что

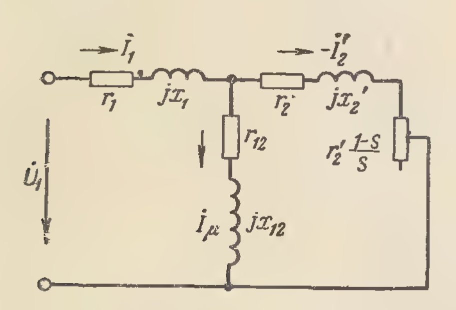


Рис. 13-16. Схема замещения асинхронной машины.

также должно быть учтено при расчете пусковых характеристик.

б) **Двигатели с контактными кольцами.** Двигатели с контактными кольцами пускаются в ход при наличии пускового реостата в роторе, который обычно рассчитывается таким образом, чтобы пусковые токи не превышали $(1 \div 1{,}5)\ I_{1н}$. Следовательно, здесь можно не учитывать насыщения от полей рассеяния. Обычно не учитывается также изменение сопротивлений r_2' и x_2' вследствие вытеснения тока при пуске, так как эти сопротивления по сравнению с сопротивлением пускового реостата малы.

в) **Короткозамкнутые двигатели.** Короткозамкнутые двигатели обычно пускаются в ход путем непосредственного включения их на номинальное напряжение сети. Поэтому пусковые токи здесь получаются большими. Они в 4—7 раз превышают номинальные токи, что приводит к заметному изменению индуктивных сопротивлений x_1 и x_2' вследствие насыщения зубцов от полей рассеяния.

Кроме того, в современных короткозамкнутых двигателях для улучшения их пусковых характеристик используется явление вытеснения тока в проводниках ротора. Чтобы сделать вытеснение тока более эффективным, роторы выполняются с глубокими пазами, или с двойной клеткой, или с пазами, утолщенными в нижней части.

Следовательно, при расчете параметров короткозамкнутых двигателей, по которым определяются токи и вращающие моменты при пуске, необходимо учитывать и насыщение зубцов от полей рассеяния и вытеснение тока в проводниках обмотки ротора.

1. *Глубокие пазы.* Как известно, вытеснение тока к открытию паза понижает использование сечения стержня и, следовательно, увеличивает его активное сопротивление. Кроме того, вытеснение тока в стержне приводит к уменьшению его индуктивного сопротивления, так как уменьшается общая проводимость индукционных трубок пазового поля рассеяния.

Далее рассматриваются методы, при помощи которых учитывается влияние вытеснения тока на параметры ротора.

Вначале находится условная глубина h_r проникновения тока в стержне, при этом принимается, что ток на данной глубине распределен равномерно. Отсюда определяется активное сопротивление стержня, заложенного в паз. Затем аналогично находится условная глубина h_x проникновения тока, по которой определяется индуктивное сопротивление стержня.

Значения h_r и h_x (рис. 13-17) определяются по следующим формулам:

$$h_r = \frac{a}{1+\varphi},\ мм; \qquad (13\text{-}49)$$

$$h_x = a\psi,\ мм, \qquad (13\text{-}50)$$

где a — высота меди или алюминия в пазу, *мм*; коэффициенты φ и ψ находятся по кривым рис. 13-18 в зависимости от величины ξ, значение которой определяется соотношением

$$\xi = 2\pi a \cdot 10^{-1} \sqrt{\frac{b}{b_п} \frac{sf_1}{\rho} \cdot 10^{-5}}; \qquad (13\text{-}51)$$

здесь отношение ширины стержня к ширине паза $b/b_п$ при глубоких пазах с медными узкими стержнями

можно принять равным 0,9, при литой алюминиевой обмотке $b/b_п \approx 1$, ρ — удельное сопротивление материала проводника.

Величина ξ является безразмерной, поэтому ее иногда называют «численной» высотой стержня.

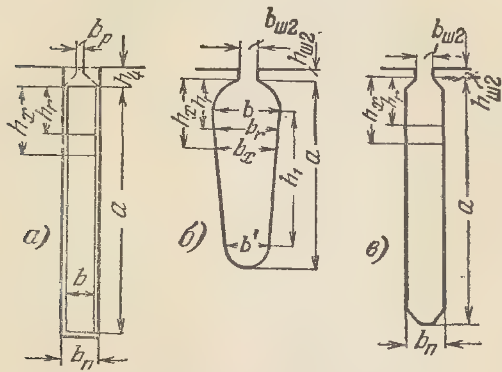


Рис. 13-17. Пазы короткозамкнутого ротора.
а — глубокий для медной обмотки; *б* и *в* — для литой алюминиевой обмотки.

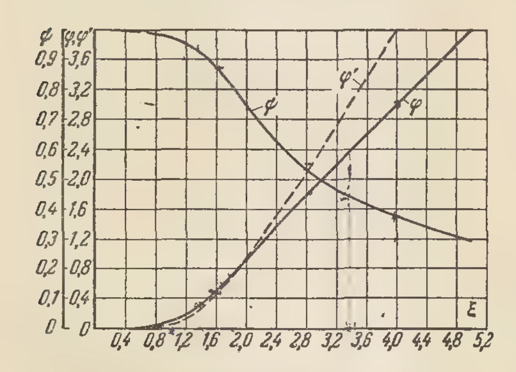


Рис. 13-18. Кривые зависимости φ, φ', ψ от ξ.

При $f_1 = 50$ *гц* и температуре обмотки 75° С получим для медных стержней ($\rho \approx 1/46$):

$$\xi = 0{,}09\, a \sqrt{s}\,; \qquad (13\text{-}52)$$

для алюминиевых стержней ($\rho \approx 1/23$)

$$\xi = 0{,}067\, a \sqrt{s}\,. \qquad (13\text{-}53)$$

В соответствии с (13-49), (13-50) и рис. 13-18 при $\xi \geqslant 2$ можно принять:

$$\left.\begin{aligned} \varphi &= \xi - 1; \quad h_r = \frac{a}{\xi}; \\ \psi &= \frac{1{,}5}{\xi}; \quad h_x = \frac{1{,}5\, a}{\xi}. \end{aligned}\right\} \qquad (13\text{-}54)$$

Для медных стержней при $a \geqslant 22$ *мм* и $s = 1$ имеем:

$$h_r = 11{,}1 \text{ мм}; \quad h_x = 16{,}7 \text{ мм};$$

для алюминиевых стержней при

$$a \geqslant 30 \text{ мм и } s = 1$$

$$h_r = 15 \text{ мм}; \quad h_x = 22{,}5 \text{ мм}.$$

Следовательно, если пренебречь сопротивлением короткозамыкающих колец, то можно считать, что для увеличения активного сопротивления роторной обмотки при пуске ($s = 1$) приблизительно в 2 раза нужно взять высоту стержня для алюминиевой обмотки равной 30 *мм*, а для медной обмотки 22 *мм*.

Активное сопротивление $r_{2\xi}$ роторной обмотки при учете вытеснения тока определяется следующим образом. Вначале нужно найти сопротивление стержня с учетом вытеснения тока $r_{c\xi}$. Оно изменяется вместе с изменением площади его сечения, соответствующей высоте h_r.

Для пазов по рис. 13-17, *а* и *б*

$$r_{c\xi} = r_c K_R; \qquad (13\text{-}55)$$

здесь

$$K_R = 1 + \frac{l_{2п}}{l_2'} \varphi, \qquad (13\text{-}56)$$

где l_2' — длина стержня; $l_{2п}'$ — длина пазовой части стержня без длины в радиальных каналах, если они имеются; φ — по рис. 13-18 для ξ по (13-52) при медной обмотке или по (13-53) при литой алюминиевой обмотке (при литой алюминиевой обмотке $l_{2п} = l_2'$).

Для паза по рис. 13-17, *б* площадь сечения стержня, соответствующая высоте h_r,

$$s_{hr} = \frac{\pi b^2}{8} + \frac{b + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b}{2}\right), \text{ мм}^2, \qquad (13\text{-}57)$$

где

$$b_r = b - \frac{b - b'}{h_1}\left(h_r - \frac{b}{2}\right), \text{ мм}; \qquad (13\text{-}57а)$$

следовательно, коэффициент, учитывающий вытеснение тока,

$$K_R = \frac{s_{hr}}{s_c}, \qquad (13\text{-}58)$$

где s_c — сечение стержня. Сопротивление $r_{c\xi}$ рассчитывается по (13-55).

При круглых пазах вытеснение тока также следует учитывать, если $\xi > 1$. Здесь ξ можно определить по (13-52) для медной обмотки или по (13-53) для алюминиевой обмотки, подставив в эти формулы вместо размера a диаметр стержня d_c.

Для круглых пазов

$$K_R = 1 + \frac{l_{2п}}{l'_2} \varphi', \tag{13-59}$$

где φ' — по рис. 13-18 (для алюминиевой обмотки $l_{2п} = l'_2$).

Искомое активное сопротивление [см. (7-14)]

$$r_{2\xi} = r_{c\xi} + \frac{2r_к}{\Delta^2}. \tag{13-60}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния $x_{2\xi}$ роторной обмотки при учете вытеснения тока определяется следующим образом.

Вытеснение тока вызывает изменение только коэффициента проводимости пазового рассеяния, который обозначим через $\lambda_{п2\xi}$. Для грушевидного паза по рис. 13-17, *б* или 7-10, $\lambda_{п2\xi}$ определяется по (7-31), где выражение в квадратных скобках нужно умножить на коэффициент ψ, значение которого в зависимости от ξ можно взять из кривой рис. 13-18.

Для паза другой формы при определении $\lambda_{п2\xi}$ следует обратиться к соответствующей формуле (7-30), (7-33), (7-34), (7-36) или (7-37), где выражение в круглых скобках нужно умножить на ψ, взяв его значение в зависимости от ξ для данного паза из кривой рис. 13-18.

Сумма коэффициентов проводимости с учетом вытеснения тока

$$\Sigma \lambda_{2\xi} = \lambda_{п2\xi} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}; \tag{13-61}$$

без учета вытеснения тока

$$\Sigma \lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}. \tag{13-62}$$

Искомое индуктивное сопротивление

$$x_{2\xi} = x_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi}}{\Sigma \lambda_2}, \tag{13-63}$$

где x_2 рассчитывается по (7-52).

Приведение сопротивлений $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ к обмотке статора производится, так же как и сопротивлений r_2 и x_2, по (7-17) и (7-54).

Определение размеров паза для заданных значений $M_{нач}$ и $I_{нач}$ производится при помощи приведенных формул для $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$. Соответствующая методика изложена и пояснена при рассмотрении конкретных примеров расчета в конце данной главы.

2. *Двойная клетка.* Двойная клетка, как отмечалось, позволяет получить лучшие пусковые характеристики, чем одинарная клетка при глубоких пазах ротора. Применяемые для нее пазы показаны на рис. 13-19, причем пазы по рис. 13-19, *а* на практике применяются очень редко. Наиболее употреби-

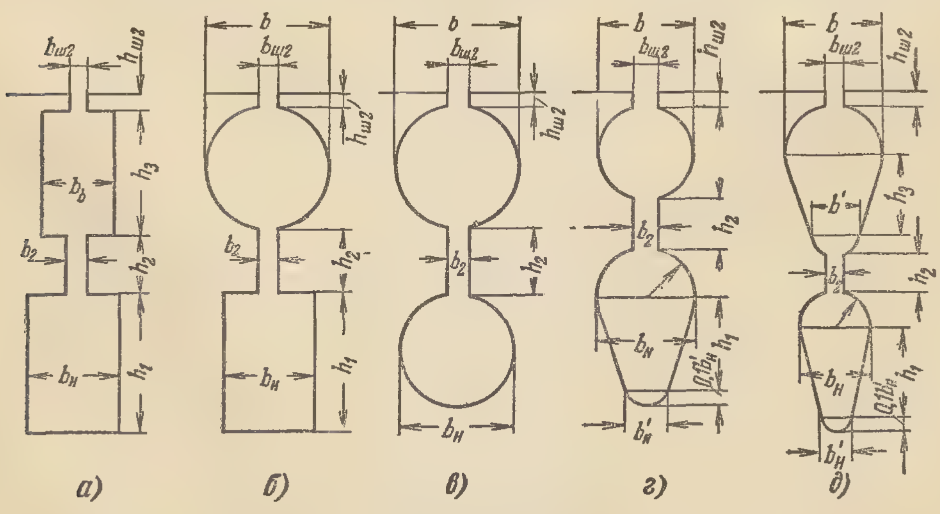


Рис. 13-19. Пазы для двойной клетки.

тельные формы пазов показаны на рис. 13-19, *в* и *г*.

Для пазов по рис. 13-19, *а*, *б* и *в* стержни, заложенные в них, на торцах, как правило, соединяются отдельными короткозамыкающими кольцами, что дает более надежную конструкцию. Употребительные формы таких колец показаны на рис. 13-13, *а*, а также на рис. 13-20, *а* и *б*. Выполняются они из меди (в

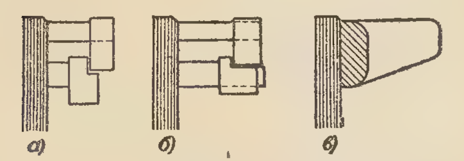


Рис. 13-20. Короткозамыкающие кольца при двойной клетке.

редких случаях верхние кольца делаются из латуни). В верхние части пазов закладываются стержни, имеющие большее активное сопротивление, чем стержни, заложенные в нижние части пазов.

При пуске в верхних стержнях протекают большие токи, поэтому они сильно нагреваются. Если приближенно допустить, что нагревание стержней в течение времени пуска происходит без отдачи тепла в окружающую среду, то можно считать, что нагревание их зависит только от их теплоемкости. Для увеличения теплоемкости верхних стержней они обычно выполняются из материала с большим удельным сопротивлением, например из латуни, бронзы (см. § 11-8).

Для двойных алюминиевых клеток применяются двойные пазы по рис. 13-19, *г*, *д*: для них выполняются общие короткозамыкающие кольца на обоих торцах ротора, причем одновременно с отливкой этих колец отличаются и вентиляционные крылья (рис. 13-20, *в*).

Параметры короткозамкнутого двигателя с двойной клеткой определяются в соответствии с его схемой замещения, которая может быть получена на основе следующих рассуждений.

Будем считать, что в машине существуют основное поле, индукционные линии которого сцепляются со всеми тремя обмотками, и поля рассеяния обмоток.

Обмотку статора *1* и обе клетки ротора — пусковую *2* и рабочую *3* — можно рассматривать как три магнитно-связанных контура (рис. 13-21). Для них, так же как для об-

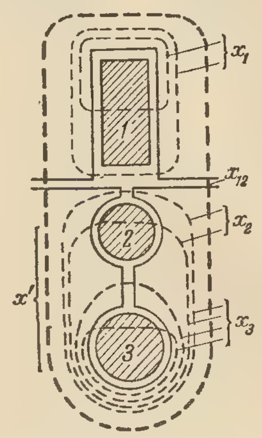


Рис. 13-21. Распределение поля в двигателе с двойной клеткой.

моток трехобмоточного трансформатора, напишем уравнения напряжений:

$$\left.\begin{aligned}\dot U_1 &= j\dot I_1 x_{11} + j\dot I'_2 x_{12} + \\ &\quad + j\dot I'_3 x_{13} + \dot I_1 r_1;\\ \dot U'_2 &= -j\dot I'_2 x_{22} - j\dot I_1 x_{21} - \\ &\quad - j\dot I'_3 (x_{23} + x') - \dot I'_2 r'_2;\\ \dot U'_3 &= -j\dot I'_3 x_{33} - j\dot I_1 x_{31} - \\ &\quad - j\dot I'_2 (x_{32} + x') - \dot I'_3 r'_3.\end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}64)$$

Здесь x_{11} — индуктивное сопротивление, соответствующее полной индуктивности обмотки статора;

x_{22} и x_{33} — то же для пусковой и рабочей клеток;

$$x_{12} = x_{13} = x_{21} = x_{23} = x_{31} = x_{32} \quad (13\text{-}65)$$

— индуктивные сопротивления взаимной индукции для соответствующей пары обмоток, обусловленной основным полем машины;

x' — индуктивное сопротивление взаимной индукции клеток *2* и *3*, обусловленной полями рассеяния (все

сопротивления, в том числе и активные сопротивления r'_2 и r'_3 обеих клеток, а также токи их I'_2 и I'_3 приведены к обмотке статора);

$$\dot{U}'_2=\dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s} \text{ и } \dot{U}'_3=\dot{I}'_3 r'_3 \frac{1-s}{s} \quad (13\text{-}66)$$

— вторичные напряжения асинхронной машины, работающей как трехобмоточный трансформатор.

Учитывая равенства (13-65), согласно (13-64) имеем:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1+\dot{U}'&=\dot{I}_1[r_1+j(x_{11}-x_{12})]-\\ &-\dot{I}'_2[r'_2+j(x_{22}-x_{12})]-\\ &-j\dot{I}'_3 x';\\ \dot{U}_1+\dot{U}'_3&=\dot{I}_1[r_1+j(x_{11}-x_{12})]-\\ &-\dot{I}'_3[r'_3+j(x_{33}-x_{12})]-\\ &-j\dot{I}'_2 x'. \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}67)$$

В соответствии с принятым распределением поля в машине (рис. 13-21) можем написать:

$$x_{11}=x_{12}+x_1; \quad x_{22}=x_{12}+x'_2;$$
$$x_{33}=x_{12}+x'_3; \quad (13\text{-}68)$$

здесь x_1, x'_2, x'_3 — индуктивные сопротивления обмоток, обусловленные собственными полями рассеяния.

Из (13-67), (13-68) и (13-66) следует:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1&=\dot{I}_1 Z_1-\dot{I}'_2 Z'_2-j\dot{I}'_3 x'-\\ &-\dot{I}'_2 r'_2\frac{1-s}{s};\\ \dot{U}_1&=\dot{I}_1 Z_1-\dot{I}'_3 Z'_3-j\dot{I}'_2 x'-\\ &-\dot{I}'_3 r'_3\frac{1-s}{s}, \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}69)$$

где

$$Z_1=r_1+jx_1; \quad Z'_2=r'_2+jx'_2;$$
$$Z'_3=r'_3+jx'_3.$$

Если учесть, что

$$\dot{I}_1+\dot{I}_2+\dot{I}'_3=\dot{I}_{c0}, \quad (13\text{-}70)$$

то получим:

$$\dot{I}_1 Z_1=\dot{I}_{c0} Z_1-(\dot{I}'_2+\dot{I}'_3) Z_1, \quad (13\text{-}71)$$

где ток I_{c0}, как и для обычного двигателя, определяется из равенства

$$-\dot{E}_1=\dot{I}_{c0} Z_{12}=\dot{I}_{c0}(r_{12}+jx_{12}). \quad (13\text{-}72)$$

Уравнениям (13-69) — (13-72) соответствует схема, представленная на рис. 13-22. Она и является схемой замещения двигателя с двойной клеткой на роторе.

Для упрощения расчетов обратимся к схеме замещения, приведенной на рис. 13-23. Она отличается от предыдущей тем, что здесь некоторые сопротивления вынесены в цепь общего тока ротора

$$\dot{I}'_{20}=\dot{I}'_2+\dot{I}'_3. \quad (13\text{-}73)$$

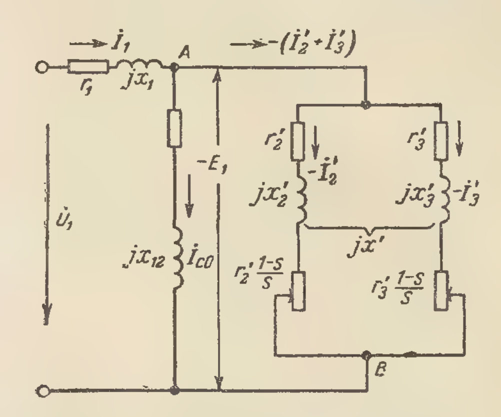


Рис. 13-22. Схема замещения двигателя с двойной клеткой.

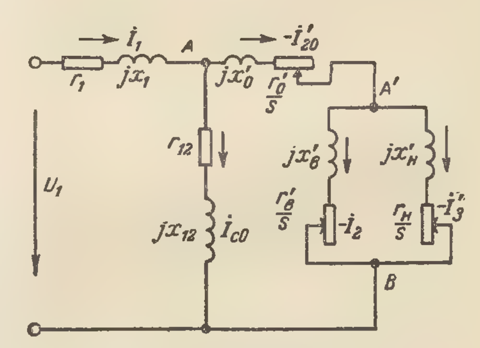


Рис. 13-23. Видоизмененная схема замещения двигателя с двойной клеткой.

Далее указывается, как рассчитываются параметры вторичных цепей схемы, представленной на рис. 13-23.

Вначале напишем уравнения напряжений параллельных ветвей между точками A и B схемы на рис. 13-22, при этом на правой стороне каждого уравнения прибавим

и вычтем одни и те же величины:

$$\left.\begin{aligned}\dot U_{AB}&=j\dot I_2' x_2'+j\dot I_3' x'+\\&+\dot I_2'\frac{r_2'}{s}+j\dot I_2' x'-j\dot I_2' x';\\ \dot U_{AB}&=j\dot I_3' x_3'+j\dot I_2' x'+\\&+\dot I_3'\frac{r_3'}{s}+j\dot I_3' x'-j\dot I_3' x'.\end{aligned}\right\}\quad(13\text{-}74а)$$

Отсюда получим:

$$\left.\begin{aligned}\dot U_{AB}&=j\dot I_2'\left(x_2'-x'\right)+\\&+j\left(\dot I_2'+\dot I_3'\right)x'+\dot I_2'\frac{r_2'}{s};\\ \dot U_{AB}&=j\dot I_3'\left(x_3'-x'\right)+\\&+j\left(\dot I_2'+\dot I_3'\right)x'+\dot I_3'\frac{r_3'}{s}\end{aligned}\right\}\quad(13\text{-}74б)$$

или

$$\left.\begin{aligned}\dot U_{AB}&=j\dot I_2' x_в'+j\dot I_{2о}' x_0'+\\&+\dot I_2'\frac{r_2'}{s};\\ \dot U_{AB}&=j\dot I_3' x_н'+j\dot I_{2о}' x_0'+\\&+\dot I_3'\frac{r_3'}{s},\end{aligned}\right\}\quad(13\text{-}74в)$$

где

$$x_0'=x';\quad x_в'=x_2'-x';$$
$$x_н'=x_3'-x'. \qquad (13\text{-}75)$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции от полей рассеяния при раздельных кольцах

$$x_0'=x'=B_x\left(\lambda_{п23}+\lambda_{д2}+\lambda_л'\right), \qquad (13\text{-}76)$$

при общих кольцах

$$x_0'=x'=B_x\left(\lambda_{п23}+\lambda_{д2}+\lambda_{л2}\right), \qquad (13\text{-}76а)$$

где B_x — по (7-56); $\lambda_{д2}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния по (7-41); $\lambda_л'$ — коэффициент проводимости взаимной индукции от поля рассеяния лобовых частей, зависящий от расположения короткозамыкающих колец и приблизительно равный $\lambda_{л.в}$ [$\lambda_{л.в}$ — по (7-49) при размерах верхнего кольца]; $\lambda_{л.2}$ — по (7-48) при размерах общего кольца; $\lambda_{п23}$ — коэффициент проводимости взаимной индукции от полей пазового рассеяния, зависящий от формы и размеров верхней части двойного паза.

Для паза по рис. 13-19, *а*

$$\lambda_{п23}=\frac{h_3}{2b_в}+\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}. \qquad (13\text{-}77)$$

Для паза по рис. 13-19, *б*, *в*, *г*

$$\lambda_{п23}=0{,}785-\frac{b_{ш2}}{2b}+\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}. \qquad (13\text{-}78)$$

Для паза по рис. 13-19, *д*

$$\lambda_{п23}=0{,}785+\frac{h_3-b_{ш2}}{2b}+\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}. \qquad (13\text{-}79)$$

Для закрытого паза ($b_{ш2}=0$) вместо $h_{ш2}/b_{ш2}$ следует подставить $0{,}3+1{,}12\frac{h_{ш2}}{I_{20}}\cdot 10^3$, где $I_{20}=I_{20}'\frac{2m_1w_1k_{о1}}{Z_2}$; формула применима при $I_{20}\geqslant 5b$ ($h_{ш2}$ и b — размеры, *мм*).

Индуктивное сопротивление верхней клетки по рис. 13-19, *а*

$$x_в'=x_2'-x'=B_x\left[\frac{h_3}{3b_в}+\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}+\lambda_{д2}+\lambda_{л.в}-\left(\frac{h_3}{2b_в}+\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}+\lambda_{д2}+\lambda_л'\right)\right]=$$
$$=B_x\left(-\frac{h_3}{6b_в}+\lambda_{л.в}-\lambda_л'\right)\approx 0. \qquad (13\text{-}80)$$

Для других пазов (по рис. 13-19, *б*, *в*, *г*, *д*) также можно принять $x_в'\approx 0$.

Индуктивное сопротивление нижней клетки $x_н'=x_3'-x'$ будет различным для пазов, приведенных на рис. 13-19:

для паза по рис. 13-19, *а*

$$x_н'=B_x\left(\frac{h_1}{3b_н}+\frac{h_2}{b_2}+\frac{h_3}{2b}+\lambda_{л.н}\right); \qquad (13\text{-}81а)$$

для паза по рис. 13-19, *б*

$$x_н'=B_x\left(\frac{h_1}{3b_н}+0{,}785-\frac{b_2}{2b}+\frac{h_2}{b_2}+\lambda_{л.н}\right); \qquad (13\text{-}81б)$$

для паза по рис. 13-19, *в*

$$x'_{н} = B_x\left(0{,}785 - \frac{b_2}{2b_{н}} + 0{,}785 - \right.$$
$$\left. - \frac{b_2}{2b} + \frac{h_2}{b_2} + \lambda_{л.н}\right); \quad (13\text{-}81в)$$

для паза по рис. 13-19, *г*

$$x'_{н} = B_x\left[\frac{h_1}{3b_{н}}\left(1 - \frac{\pi b_{н}^2}{8s_{с.н}}\right)^2 + 0{,}66 - \right.$$
$$- \frac{b_2}{2b_{н}} + 0{,}785 - \frac{b_2}{2b} +$$
$$\left. + \frac{h_2}{b_2} + \lambda_{л.н}\right]; \quad (13\text{-}81г)$$

для паза по рис. 13-19, *д*

$$x'_{н} = B_x\left[\frac{h_1}{3b_{н}}\left(1 - \frac{\pi b_{н}^2}{8s_{с.н}}\right) + 0{,}66 - \right.$$
$$- \frac{b_2}{2b_{н}} + 0{,}785 - \frac{h_3}{b} - \frac{b_2}{2b'} +$$
$$\left. + \frac{h_2}{b_2} + \lambda_{л.н}\right], \quad (13\text{-}81д)$$

где $\lambda_{л.н}$ — по (7-49) при размерах нижнего короткозамыкающего кольца;
$s_{с.н}$ — сечение нижнего стержня, *мм*²; $b_{н}^2$ — размер, *мм*².

Формулы для $x'_{н}$ приведены для клеток с раздельными короткозамыкающими кольцами; при общих короткозамыкающих кольцах следует принять $\lambda_{л.н}=0$.

При выводе формул мы пренебрегали вытеснением тока в стержнях, так как для верхнего стержня обычно $\xi<1$; для нижнего стержня, если $\xi>1$, вытеснение тока можно учесть так же, как при глубоких пазах, но и для нижнего стержня в большинстве случаев $\xi<1$. По той же причине не учитывалось влияние вихревых токов, наведенных в верхнем стержне полем взаимоиндукции пазового рассеяния.

Значения активных сопротивлений схемы рис. 13-23 определяются по следующим формулам:

при раздельных короткозамыкающих кольцах

$$r'_0 = 0; \quad r'_{в} = v\left(r_{с.в} + \frac{2r_{к.в}}{\Delta^2}\right);$$
$$r'_{н} = v\left(r_{с.н} + \frac{2r_{к.н}}{\Delta^2}\right); \quad (13\text{-}82)$$

при общих короткозамыкающих кольцах

$$r'_0 = v\frac{2r_{к}}{\Delta^2}; \quad r'_{в} = vr_{с.в};$$
$$r'_{н} = vr_{с.н}, \quad (13\text{-}83)$$

где $r_{с.в}$, $r_{к.в}$ — сопротивления стержня и части короткозамыкающего кольца верхней клетки; $r_{с.н}$, $r_{к.н}$ — то же нижней клетки; Δ, v — по (7-15) и (7-16).

Пренебрежение величиной $x'_{в}$ практически не влияет на общий ток $\dot{I}'_{2о}=\dot{I}'_2+\dot{I}'_3=\dot{I}'_{в}+\dot{I}'_{н}$; токи же $\dot{I}'_{в}$ и $\dot{I}'_{н}$ мало отличаются от действительных приведенных токов в клетках — обычно не больше чем на 5—6%.

При $x_{в}\approx 0$ определение сопротивлений — активного $r'_{э}/s$ и индуктивного $x'_{э}$ эквивалентной цепи, заменяющей собой две параллельные ветви между точками A' и B рис. 13-23, не представляет затруднений.

Полное сопротивление этих параллельных ветвей

$$Z'_{э} = \frac{\frac{r'_{в}}{s}\left(\frac{r'_{н}}{s} + jx'_{н}\right)}{\frac{r'_{в}+r'_{н}}{s} + jx_{н}} = \frac{\frac{r'_{в}}{s}\left(\frac{r'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}} + j\frac{x'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}}s\right)}{1 + j\frac{x'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}}s}.$$

Если ввести обозначение

$$s' = \frac{x'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}}s, \quad (13\text{-}84)$$

то получим:

$$Z'_{э} = \frac{\frac{r'_{в}}{s}\left(\frac{r'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}} + js' - j\frac{r'_{н}}{r'_{в}+r'_{н}}s' + s'^2\right)}{1+s'^2} = \frac{r'_{э}}{s} + jx'_{э},$$

а отсюда

$$\frac{r'_{э}}{s} = \frac{r''_0}{s}\,\frac{1 + \left(1 + \frac{r'_{в}}{r'_{н}}\right)s'^2}{1+s'^2}$$

или

$$\frac{r''_э}{s} = \frac{r''_0}{s} k_r, \qquad (13\text{-}85)$$

где при

$$\alpha = \frac{r''_в}{r'_н} \qquad (13\text{-}86)$$

$$r''_0 = \frac{r'_в r'_н}{r'_в + r'_н} = r'_н \frac{\alpha}{1+\alpha}; \qquad (13\text{-}87)$$

$$x'_э = \frac{\frac{r'_в}{s}\left(s' - \frac{r'_н}{r'_в + r'_н} s'\right)}{1 + s'^2} = \frac{x'_н\left[\frac{r'_в}{r'_в + r'_н} - \frac{r'_в r'_н}{(r'_в + r'_н)^2}\right]}{1 + s'^2}$$

или

$$x'_э = x'_н\left(\frac{r'_в}{r'_в + r'_н}\right)^2 k_x = x'_н\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 k_x, \qquad (13\text{-}89)$$

где

$$k_x = \frac{1}{1+s'^2} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{s'^2}}. \qquad (13\text{-}90)$$

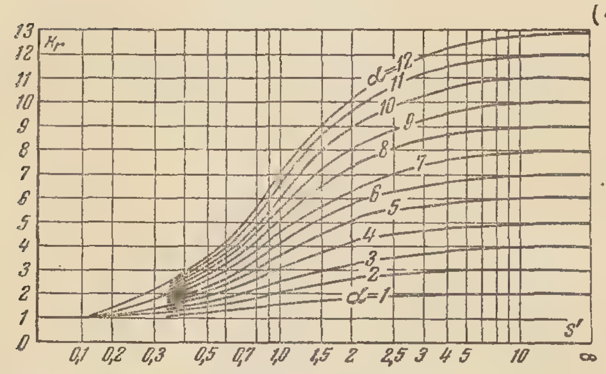


Рис. 13-24. Зависимость коэффициента k_r от $s' = \frac{x'_н}{r'_в + r'_н} s$ при различных $\alpha = r'_в / r'_н$.

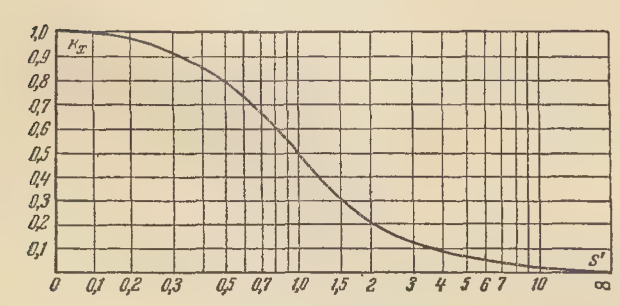


Рис. 13-25. Зависимость коэффициента k_x от $s' = \frac{x''_н}{r'_в + r'_н} s$.

$$k_r = \frac{1 + \left(1 + \frac{r'_в}{r'_н}\right) s'^2}{1 + s'^2} = 1 + \alpha \frac{1}{1 + \frac{1}{s'^2}}; \qquad (13\text{-}88)$$

Теперь мы можем определить эквивалентные сопротивления роторной цепи при двойной клетке на роторе:

$$\frac{r'_{2э}}{s} = \frac{r''_0}{s} k_r + \frac{r'_0}{s} = \frac{r''_н}{s} \frac{\alpha}{1+\alpha} k_r + \frac{r'_0}{s}; \qquad (13\text{-}91)$$

$$x'_{2э} = x'_н\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 k_x + x'_0. \qquad (13\text{-}92)$$

Значения коэффициентов k_r и k_x в зависимости от s' могут быть взяты из кривых рис. 13-24 и 13-25, построенных по (13-88) и (13-90) (обычно s' мало отличается от действительного скольжения s).

Таким образом, исследование машины с двойной клеткой на роторе может производиться при помощи схемы замещения нормальной машины (рис. 13-16); следует, однако, иметь в виду, что сопротивления этой схемы $r'_2 = r'_{2э}$ и $x'_2 = x'_{2э}$ зависят от скольжения.

Параметры роторной цепи двигателя с двойной клеткой, необходимые для построения круговой диаграммы и расчета рабочих характеристик, находятся по (13-91) и (13-92), где можно принять $k_r = 1$

и $k_x=1$, так как рабочий режим двигателя характеризуется изменением скольжения примерно в пределах от 0 до 2—4%. При этом получим:

$$\frac{r'_{2э(s\approx 0)}}{s}=\frac{r'_{э(s\approx 0)}}{s}+\frac{r'_0}{s}=$$

$$=\frac{r'_н}{s}\frac{\alpha}{1+\alpha}+\frac{r'_0}{s};\qquad (13\text{-}93)$$

$$x'_{2э(s\approx 0)}=x'_{э(s\approx 0)}+x'_0=$$

$$=x'_н\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2+x'_0.\qquad (13\text{-}94)$$

Для определения параметров, по которым рассчитываются пусковые характеристики, нужно обращаться к (13-91) и (13-92), учитывая изменения k_r и k_x при изменении s.

При больших скольжениях, как указывалось, необходимо учитывать вытеснение тока. В этом случае вместо величин $r'_н$ и $x'_н$ (при $\xi>1$, что бывает редко) следует брать величины $r'_{н\xi}$ и $x'_{н\xi}$, как при глубоких пазах.

При больших токах (примерно больше $2I_{1н}$) следует также учитывать влияние насыщения, вызванного полями рассеяния. Оно сказывается главным образом на величине x'_0 вследствие насыщения коронок и усиков зубцов (§ 13-7, *г*).

Выбор размеров паза производится таким образом, чтобы при заданном начальном пусковом токе $I_{нач}$ получился заданный начальный пусковой момент $M_{нач}$. При этом к. п. д. двигателя с двойной клеткой не должен отличаться от к. п. д. нормального двигателя на ту же номинальную мощность, тогда как для $\cos\varphi$ в обычных случаях допускается снижение на 0,02—0,05. Максимальный вращающий момент также не должен быть ниже установленного ГОСТ 183-66.

Расчет двигателя с двойной клеткой можно вначале выполнять так же, как нормального двигателя с контактными кольцами; при этом значение к. п. д. можно брать по рис. 13-3 или 13-5.

По значению к. п. д. находим общие потери в машине. Далее расчетом определяем потери: в статоре (электрические и основные магнитные), пульсационные и поверхностные, механические и добавочные при нагрузке. Вычитая из общих потерь перечисленные, найдем электрические потери в обмотке ротора $P_{э2}$. Отсюда определяем ее сопротивление

$$r'_{2э(s\approx 0)}=\frac{P_{э2}}{m_1 I'^2_{20н}},\ ом;\qquad (15\text{-}95)$$

здесь $I'_{20н}$ — ток ротора при номинальной нагрузке, приведенный

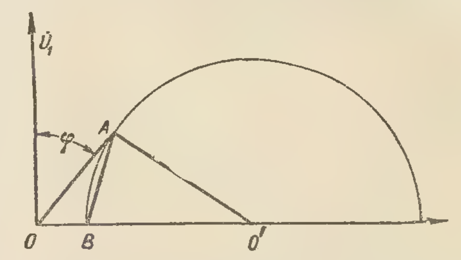


Рис. 13-26. Приближенная круговая диаграмма асинхронного двигателя.

к обмотке статора. Его значение может быть найдено при помощи приближенной круговой диаграммы, представленной на рис. 13-26. На ней обозначают:

$$\overline{OA}=I_1;\quad \overline{OB}=I_\mu;\quad \overline{BA}=I'_{20};$$

$$\overline{O'A}=\overline{O'B}\approx\frac{U_1}{2\left(x_1+x'_{2э(s\approx 0)}\right)}.$$

Из диаграммы получаем:

$$I'_{20н}\approx I_1\sqrt{\cos^2\varphi+\left(\sin\varphi-\frac{I_\mu}{I_1}\right)^2},\qquad (13\text{-}96)$$

где $I_1=I_н$ — номинальный ток статора; I_μ — намагничивающий ток, полученный из предварительного расчета; $\cos\varphi$ берется на 0,02—0,05 меньше, чем по рис. 13-4 или 13-6.

Уменьшение $\cos\varphi$ зависит от заданного $\varkappa_п=m_{нач}/i_{нач}$ [см. (13-42)]. В обычных случаях для двигателя с двойной клеткой имеем $m_{нач}=1,4\div 2,2$; $i_{нач}=4\div 6$, чему соответствует $\varkappa_п\approx 0,35\div 0,5$.

При больших значениях $\varkappa_п$ требуется большее снижение $\cos\varphi$. При двойной клетке можно получить $\varkappa_п=0,75\div 0,8$, что практически недо-

стижимо при глубоких, бутылочных или клинообразных пазах. Однако при этом приходится идти на значительное снижение $\cos\varphi$, а также для сохранения надлежащего максимального момента на увеличение B_δ и уменьшение A, что удорожает машину.

По значению $r'_{2э(s\approx0)}$ из (13-95) находим согласно (13-93):

$$r'_{э(s\approx0)} = r'_н \frac{\alpha}{1+\alpha} = r'_{2э(s\approx0)} - r'_0. \quad (13\text{-}97)$$

Для получения $\cos\varphi$, приблизительно равного заданному, необходимо иметь определенное значение $x_1 + x'_2$. Это значение можно найти при помощи той же круговой диаграммы на рис. 13-26. Оно равно:

$$x_1 + x'_{2э(s\approx0)} = \frac{U_1}{I_1}\,\frac{\sin\varphi - \dfrac{I_\mu}{I_1}}{1+\left(\dfrac{I_\mu}{I_1}\right)^2 - 2\dfrac{I_\mu}{I_1}\sin\varphi}. \quad (13\text{-}98)$$

Так как значение x_1 из расчета известно — оно определяется выбором обмотки, числа пазов статора и их размерами, а также размером δ, то из (13-98), зная x_1, находим $x'_{2э(s\approx0)}$. Из (13-94) получаем:

$$x'_{э(s\approx0)} = x'_н \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 = x'_{2э(s\approx0)} - x'_0. \quad (13\text{-}99)$$

Значение x'_0 [см. (13-76)—(13-79)] предварительно можно оценить, выбрав число пазов ротора Z_2 и размеры $h_{ш2}=0{,}5\div1{,}2$ *мм*, $b_{ш2}=1{,}5\div2$ *мм*.

Параметры роторной обмотки при неподвижном роторе ($s=1$) определяются следующим образом.

Сначала находится активное сопротивление ротора по заданным $m_{нач}$ и $i_{нач}$:

$$r'_{2э} \approx r'_{2э(s\approx0)}\, m_{нач} \left(\frac{1}{i_{нач}}\right)^2 \frac{1}{s_н},\ ом, \quad (13\text{-}100)$$

где номинальное скольжение

$$s_н \approx \frac{I'_{20н}\, r'_{2э(s\approx0)}}{k_E\, U_1}. \quad (13\text{-}101)$$

Затем определяется эквивалентное активное сопротивление двух параллельных ветвей схемы на рис. 13-23

$$r'_э = r'_{2э} - r'_0, \quad (13\text{-}102)$$

где $r'_0=0$ при раздельных кольцах и $r'_0 \approx (0{,}10 \div 0{,}15)\ r_{2э(s\approx0)}$ при общих кольцах.

Так как активное сопротивление статора r_1 из расчета известно, то с достаточной точностью получаем активное сопротивление машины при неподвижном роторе

$$r_к \approx r_1 + r'_{2э}. \quad (13\text{-}103)$$

Далее по заданному начальному току $I_{нач}$ определяем полное сопротивление машины при неподвижном роторе

$$z_{к.н} = \frac{U_1}{I_{нач}}; \quad (13\text{-}104)$$

здесь $z_{к.н}$ — сопротивление, учитывающее насыщение зубцов статора и ротора от полей рассеяния*.

Зная $z_{к.н}$ и $r_к$, находим:

$$x_{к.н} \approx \sqrt{z^2_{к.н} - r^2_{к.н}},\ ом. \quad (13\text{-}105)$$

Индуктивное сопротивление статора $x_{1н}$ с учетом насыщения определяется путем расчета, так как все необходимые для этого данные известны. Значение общего для обеих клеток сопротивления $x'_{0н}$ также определяется расчетом (вследствие насыщения здесь изменяются $\lambda_{д2}$ и $h_{ш2}/b_{ш2}$. Следовательно, получим:

$$x'_э = x_{к.н} - x_{1н} - x'_{0н}. \quad (13\text{-}106)$$

Теперь по сопротивлениям $r'_{э(s\approx0)}$, $r'_э$, $x_э$, найденным соответственно по (13-97), (13-102), (13-106), могут быть определены сопротивления $r'_в$ и $r'_н$ и приближенно размеры паза ротора.

Из (13-88)—(13-90) с учетом (13-84) и (13-87) при $s=1$ получаем:

$$s' = \frac{r''_0\,(k_r - 1)}{x'_э} = \frac{r'_{э(s\approx0)}\,(k_r - 1)}{x'_э}, \quad (13\text{-}107)$$

---

* Способы учета этого насыщения рассматриваются в § 13-7, г. Обозначениям параметров, которые определены с учетом насыщения, будем приписывать индекс «н».

где k_r определяется из равенства $r'_э = r_{э(s\approx 0)} k_r$.

Далее непосредственно рассчитываем

$$k_x = \frac{1}{1 + s'^2}. \qquad (13\text{-}108)$$

Из (13-88) и (13-90) получим:

$$\alpha = \frac{r'_в}{r'_н} = \frac{k_r - 1}{1 - k_x}. \qquad (13\text{-}109)$$

В соответствии с (13-87) имеем:

$$r'_в = (1 + \alpha) r'_{э(s\approx 0)} \qquad (13\text{-}109а)$$

и

$$r'_н = \frac{1+\alpha}{\alpha} r_{э\,(s\approx 0)}. \qquad (13\text{-}109б)$$

Обычно $\alpha = 3 \div 6$, но иногда доходит до 8—10. При наиболее часто применяемых пазах по рис. 13-19, *в*, при которых верхние стержни делаются из латуни, размеры верхней и нижней частей паза обычно мало различаются.

Из (13-89) следует:

$$x'_н = \frac{x'_э \left(\frac{1+\alpha}{\alpha}\right)^2}{k_x}; \qquad (13\text{-}110)$$

отсюда с учетом (13-81в) для паза по рис. 13-19, *в*

$$\frac{h_2}{b_2} \approx \frac{x'_н}{B_x k_x} - 2{,}1. \qquad (13\text{-}111)$$

Для других двойных пазов при определении h_2/b_2 вместо 2,1 следует подставить величину, близкую к 2, 1, оценив ее приближенно в зависимости от выбранной формы паза [см. (13-81)]. Размер b_2 обычно выбирается в пределах 1,5—3 *мм*. Для двигателей с повышенным пусковым моментом до 9-го габарита включительно, как правило, применяется литая алюминиевая обмотка *при пазах по рис.* 13-19, *г* и *д*; *для* двигателей свыше 9-го габарита — двойная клетка при пазах по рис. 13-19, *в*.

По найденным $r'_в$, $r'_н$ определяются размеры стержней и короткозамыкающих колец, а следовательно, при найденных размерах прорези h_2 и b_2 — размеры паза.

После определения размеров паза, стержней и колец следует найти плотности тока в стержнях и кольцах при номинальной нагрузке. Для этого нужно найти ток $I'_{20н}$ при номинальной нагрузке, который предварительно определяется по току $I_{1н}$ и $\cos\varphi$, и затем приведенные токи $I'_в$ и $I'_н$ по соотношениям:

$$I'_в \approx I'_{20н} \frac{r'_н}{r'_в + r'_н} = I'_{20н} \frac{1}{1+\alpha}; \qquad (13\text{-}112)$$

$$I'_н \approx I'_{20н} \frac{r'_в}{r'_в + r'_н} = I'_{20н} \frac{\alpha}{1+\alpha}. \qquad (13\text{-}113)$$

Далее определяются действительные токи в стержнях и кольцах и по ним искомые плотности тока.

По размерам паза и короткозамыкающих колец определяется значение $x_{э\,(s\approx 0)}$. Оно не должно заметно отличаться от значения, найденного по (13-99).

В дальнейшем более точно определяются параметры ротора и статора, по которым рассчитываются рабочие и пусковые характеристики. Они позволяют проверить перегрузочную способность и найти номинальный $\cos\varphi$ двигателя (см. пример расчета в конце данной главы).

3. *Бутылочные (колбообразные) пазы.* Как указывалось, при пазах по рис. 13-27, *а* применяются медные стержни, изготовление которых встречает некоторые затруднения. Здесь необходимо иметь возможно более плотное соприкосновение стержней со стенками пазов, особенно в их верхней части, чтобы избежать искрения между стенками пазов и стержнями при пуске двигателя. Целесообразно также несколько увеличить длину вылета стержней (от торцов сердечника ротора до короткозамыкающих колец), чтобы снизить механические напряжения в стержнях в местах их выхода из пазов.

При пазах по рис. 13-27, *б* применяется литая алюминиевая обмотка. Такие пазы находят применение для короткозамкнутых двигателей 10-го и иногда 11-го габарита, причем для

двухполюсных двигателей нередко выбираются закрытые пазы с толщиной мостика перекрытия до 2—3 *мм*.

Расчет параметров короткозамкнутой обмотки ротора при бутылочных пазах может производиться так же, как при двойных пазах [Л. 54].

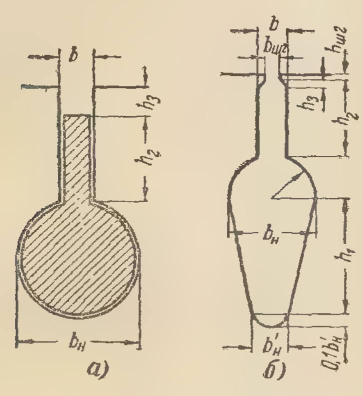


Рис. 13-27. Бутылочные пазы.

Можно считать, что нижняя часть стержня (круглая на рис. 13-27, *а* и грушевидная на рис. 13-27, *б*) относится к рабочей обмотке, а верхняя — к пусковой. Таким образом, мы имеем как бы двойную клетку с общими короткозамыкающими кольцами.

Обычно размер h_2 при пазах по рис. 13-27 соответствует $\xi<1$. Поэтому можно не учитывать вытеснения тока в верхней части стержня от собственного поля пазового рассеяния и от поля взаимоиндукции пазового рассеяния нижней части стержня. В случае $\xi>1$ для верхней части стержня расчет параметров обмотки ротора несколько усложняется [Л. 54].

При алюминиевой обмотке (пазы по рис. 13-27, *б*) размер h_2 обычно не превышает 15 *мм*, что дает $\xi<1$.

Для нижней части паза иногда получается $\xi>1$. В этом случае следует учесть влияние вытеснения тока на параметры $r'_н$ и $x'_н$, как при глубоких пазах ротора.

Значения параметров верхней и нижней клеток, на которые условно разделяются рассматриваемые обмотки ротора, определяются, как и при двойной клетке, в соответствии со схемой замещения на рис. 13-23.

Для пазов по рис. 13-27

$$x'_0 = x' = B_x\left(\lambda_{п\,23} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}\right), \quad (13\text{-}114)$$

где для паза по рис. 13-27, *а*

$$\lambda_{п\,23} = \frac{h_2}{2b} + \frac{h_3}{b}; \quad (13\text{-}115а)$$

для паза по рис. 13-27, *б*

$$\lambda_{п\,23} = \frac{h_2}{2b} + \frac{3h_3}{b + 2b_{ш2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}. \quad (13\text{-}115б)$$

В случае закрытого паза вместо $h_{ш2}/b_{ш2}$ следует подставить величину, приведенную в указаниях к формулам (13-77)—(13-79). Определение $\lambda_{д2}$ и $\lambda_{л2}$ производится по (7-41) и (7-48).

Индуктивное сопротивление $x'_в$ здесь также может быть принято равным нулю.

Индуктивное сопротивление нижней части стержня рассчитывается по формулам:

для пазов по рис. 13-27, *а*

$$x'_н = B_x\left[\left(0{,}785 - \frac{b}{2b_н}\right)\psi + \frac{h_2}{2b}\right]; \quad (13\text{-}116)$$

для пазов по рис. 13-27, *б*

$$x'_н = B_x\left\{\left[\frac{h_1}{3b_н}\left(1 - \frac{\pi b_н^2}{8s_{с.н}}\right) + 0{,}66 - \frac{b}{2b_н}\right]\psi + \frac{h_2}{2b}\right\}, \quad (13\text{-}117)$$

где $s_{с.н}$ — сечение нижней части стержня, *мм*²; $b_н^2$ — размер, *мм*²; ψ — по рис. 13-18 для ξ по (13-52) или (13-53) (если $\xi<1$, можно принять $\psi=1$).

Активное сопротивление $r'_0 = v\frac{2r_к}{\Delta^2}$ [см. (7-13)—(7-16)].

Активное сопротивление $r'_н = v r_{с.н} K_R$, где K_R определяется по (13-59) или (13-58).

Выбор размеров бутылочных пазов производится аналогично выбору размеров пазов для двойной клетки. Здесь также можно по заданным $m_{нач}$ и $i_{нач}$ найти значения

$r''_{2э(s\approx 0)}$, $r'_{э(s\approx 0)}$, $r'_э$, $x'_э$ и в соответствии с этими значениями подобрать размеры паза.

4. *Клинообразные пазы.* Клинообразный паз и соответствующий ему по сечению стержень показаны на рис. 13-28; здесь же указаны обозначения их размеров.

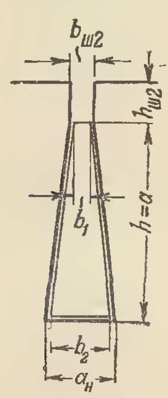


Рис. 13-28. Клинообразные паз и стержень.

Активное сопротивление стержня r_c без учета вытеснения тока рассчитывается для сечения

$$s_c = h\frac{b_1+b_2}{2}, \text{ мм}^2. \quad (13\text{-}118)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния без учета вытеснения тока рассчитывается по формуле

$$\lambda_п = \frac{h}{3b_н}y(\beta) + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}, \quad (13\text{-}119)$$

где значение $y(\beta)$ при $\beta = b_1/b_2$ может быть найдено по кривой рис. 13-29.

Активное сопротивление стержня $r_{c\xi}$ (его пазовой части) и коэффициент $\lambda_{п\xi}$ с учетом вытеснения тока рассчитываются по формулам:

$$r_{c\xi} = k_r r_c; \quad (13\text{-}120)$$

$$\lambda_{п\xi} = k_x\frac{h}{3b_н} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}, \quad (13\text{-}121)$$

где коэффициенты k_r и k_x могут быть взяты из кривых рис. 13-30 и 13-31 в зависимости от ξ [определяется по (13-52)] при $\beta = b_1/b_2$.

При определении размеров клинообразного паза для заданных $m_{нач}$ и $i_{нач}$ расчет производится аналогично расчету при глубоком пазе*. Рекомендуется брать $\beta = 0{,}3 \div 0{,}6$ при $b_1 = 2{,}5 \div 5$ *мм*.

Параметры роторной обмотки при клинообразных пазах соответствуют лучшим рабочим и пусковым характеристикам, чем при глубоких

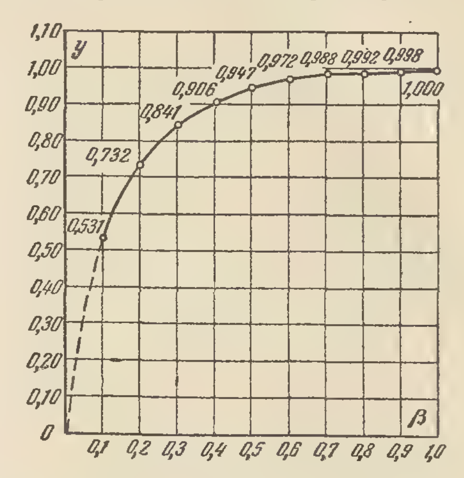


Рис. 13-29. К определению $\lambda_п$ клинообразного паза без учета насыщения.

пазах, и в ряде случаев клинообразные пазы могут с успехом заменить глубокие, несмотря на некоторое усложнение технологии изготовле-

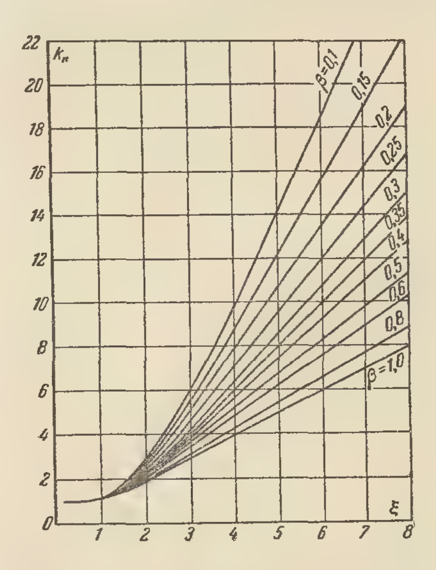


Рис. 13-30. Коэффициент k_r для клинообразного и прямоугольного пазов в зависимости от ξ при различных β ($\xi \approx 0{,}09a\sqrt{s}$; $\beta = b_1/b_2$).

* См. пример расчета в конце данной главы.

ния стержней и их соединения с короткозамыкающими кольцами.

Клинообразные пазы целесообразно применять для мощных быстроходных двигателей (при $2p$, равном 4 или 2). При выполнении двигателей с такими пазами в их нижнюю часть под стержни забиваются

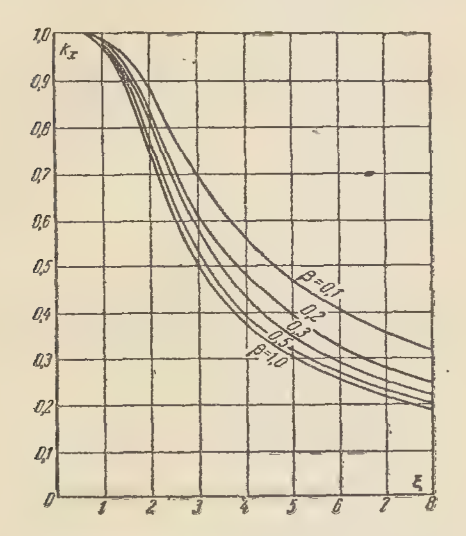


Рис. 13-31. Коэффициент k_x для клинообразного и прямоугольного пазов в зависимости от ξ при различных β $\xi \approx 0{,}09 a \sqrt{s}$; $\beta = b_1/b_2$.

два стальных клина, имеющих небольшой наклон с одной стороны. Тем самым достигается более плотное прилегание стержней к стенкам пазов, что обеспечивает меньший их нагрев за время пуска (см. § 11-8) и способствует устранению искрения между стержнями и стенками пазов при пуске.

г) **Учет влияния насыщения на индуктивные сопротивления рассеяния.** Как отмечалось, индуктивные сопротивления рассеяния асинхронной машины не остаются постоянными. При больших скольжениях вследствие вытеснения тока изменяется индуктивное сопротивление $x_{2\xi}$. При больших токах в обмотках вследствие насыщения главным образом усиков и коронок зубцов, вызванного пазовым и дифференциальным полями рассеяния, изменяются x_1 и $x_{2\xi}$ (приближенно считают, что оба явления — вытеснение тока в проводниках ротора и насыщение его зубцов — взаимно не связаны).

Изменение x_1 и $x_{2\xi}$ из-за насыщения зубцов может быть учтено лишь с некоторым приближением. В последующем приводятся соответствующие методы расчета*.

Действительное значение тока короткого замыкания

$$I_{к.н} = k_н I_к, \qquad (13\text{-}122)$$

где $I_к$ — ток короткого замыкания, рассчитанный без учета насыщения;

$k_н$ — коэффициент, учитывающий насыщение от полей рассеяния.

Предварительно на основе опытных данных выбирается значение $k_н$: для двигателей с полузакрытыми (углубленными или глубокими) пазами ротора при полузакрытых пазах статора $k_н = 1{,}3 \div 1{,}4$; при полуоткрытых и открытых пазах статора $k_н = 1{,}2 \div 1{,}3$ (больше при полуоткрытых пазах); для двигателей с двойной клеткой на роторе $k_н = 1{,}2 \div 1{,}25$ (при открытых пазах статора брать меньшее значения); для двигателей с закрытыми пазами ротора $k_н = 1{,}3 \div 1{,}45$. На основании дальнейшего расчета значение $k_н$ уточняется.

Затем определяется средняя н. с., отнесенная к одному пазу статора,

$$F_{п.ср} = 0{,}7 \frac{I_{к.н} u_п}{a_1} \times$$

$$\times \left(k_\beta + k_{у1} k_{о1} \frac{Z_1}{Z_2}\right), \ a, \qquad (13\text{-}123)$$

где $u_п$ — число эффективных проводников в пазу статора;

a_1 — число параллельных ветвей обмотки статора;

k_β — коэффициент, учитывающий уменьшение н.с. вследствие укорочения шага (берется из кривой рис. 13-32 в зависимости от $\beta = y/\tau$);

* См. [Л. 97], где изложены методы, разработанные и принятые в расчетной практике завода «Электросила», см. также [Л. 102 и 103].

k_{y1} и k_{o1} — коэффициент укорочения и обмоточный коэффициент обмотки статора;

Z_1 и Z_2 — числа пазов статора и ротора.

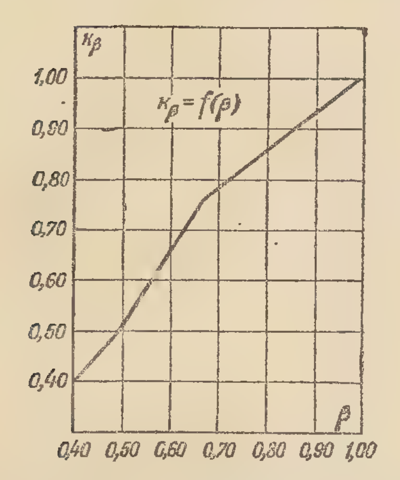


Рис. 13-32. Коэффициент, учитывающий уменьшение н. с. вследствие укорочения шага обмотки.

Далее рассчитывается фиктивная (условная) индукция в воздушном зазоре

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1,6\delta C_н}; \qquad (13\text{-}124)$$

здесь воздушный зазор δ, *см*, и коэффициент

$$C_н = 0,64 + 2,5\sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}, \qquad (13\text{-}125)$$

где δ и зубцовые деления статора t_1 и ротора t_2 должны быть взяты в сантиметрах или миллиметрах.

Для фиктивной индукции $B_{\Phi\delta}$ по кривой, представленной на рис. 13-33, находится коэффициент $\varkappa_\delta$, характеризующий отношение потока рассеяния с учетом насыщения к потоку рассеяния без учета насыщения.

Вследствие насыщения верхних частей зубцов уменьшается коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния. В соответствии с этим определяется эквивалентное изменение открытия паза для учета влияния насыщения на пазовое расстояние. Для статора оно принимается равным

$$C_1 = (t_1 - b_{ш1})(1 - \varkappa_\delta), \qquad (13\text{-}126)$$

где t_1 и $b_{ш1}$ — размеры, *мм*.

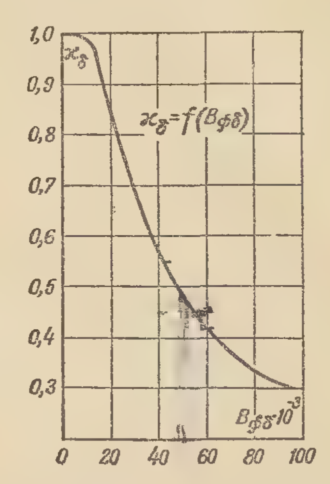
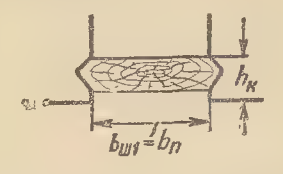


Рис. 13-33. Коэффициент, характеризующий отношение потока рассеяния с учетом насыщения к потоку рассеяния без учета насыщения.

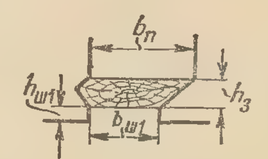
Теперь может быть определено уменьшение коэффициента проводимости пазового рассеяния из-за насыщения:

для открытого паза



$$\Delta\lambda_{1н} = \frac{h_к}{b_п}\left(\frac{C_1}{C_1 + b_п}\right); \qquad (13\text{-}127)$$

для полуоткрытого паза



$$\Delta\lambda_{1н} = C_1\left[\frac{h_{ш1}}{b_{ш1}(C_1 + b_{ш1})} + \frac{h_з}{(b_п + b_{ш1})(C_1 + b_{ш1} + b_п)}\right]; \qquad (13\text{-}128)$$

для полузакрытого паза

$$\Delta\lambda_{1н} = \frac{h_{ш1}+0,58h_3}{b_{ш1}}\left(\frac{C_1}{C_1+1,5b_{ш1}}\right). \qquad (13\text{-}129)$$

Следовательно, для статора

$$\lambda_{п\,1н} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{1н}, \qquad (13\text{-}130)$$

где $\lambda_{п1}$ рассчитывается без учета насыщения по одной из формул, приведенных в § 7-2, соответственно выбранной форме паза статора.

Вследствие насыщения коронок зубцов уменьшается коэффициент проводимости дифференциального рассеяния. Он теперь будет:

$$\lambda_{д1н} = \lambda_{д1}\,\varkappa_\delta. \qquad (13\text{-}131)$$

Сумма коэффициентов проводимости рассеяния статора при насыщении

$$\Sigma\lambda_{1н} = \lambda_{п\,1н} + \lambda_{д\,1н} + \lambda_{л1}. \qquad (13\text{-}132)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора с учетом насыщения определяется следующим соотношением:

$$x_{1н} = x_1\frac{\Sigma\lambda_{1н}}{\Sigma\lambda_1}. \qquad (13\text{-}133)$$

Аналогично рассчитывается индуктивное сопротивление рассеяния ротора с учетом насыщения зубцов.

Для ротора с одной клеткой эквивалентное изменение открытия паза принимается равным

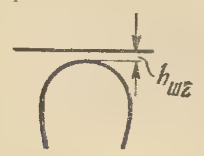
$$C_2 = (t_2 - b_{ш2})(1 - \varkappa_\delta). \qquad (13\text{-}134)$$

Уменьшение коэффициента проводимости пазового рассеяния из-за насыщения:

для полузакрытого паза

$$\Delta\lambda_{2н} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}\left(\frac{C_2}{C_2+b_{ш2}}\right); \qquad (13\text{-}135)$$

для закрытого паза



$$\Delta\lambda_{2н} = \lambda_ш - \lambda_{ш.н}, \qquad (13\text{-}136)$$

где $\lambda_ш$ находится по (7-32) или (7-35) при номинальном токе ротора $I_{2н}$, а $\lambda_{ш.н}$ — при токе $I_{2к.н} \approx k_н I_{2н}$.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния ротора при учете вытеснения тока и насыщения равен:

$$\lambda_{п2\xi н} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{2н}. \qquad (13\text{-}137)$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ротора рассчитывается так же, как для статора:

$$\lambda_{д2н} = \lambda_{д2}\,\varkappa_\delta. \qquad (13\text{-}138)$$

Сумма коэффициентов проводимости при учете вытеснения тока и насыщения зубцов

$$\Sigma\lambda_{2\xi н} = \lambda_{п2\xi н} + \lambda_{д2н} + \lambda_{л2}; \qquad (13\text{-}139)$$

следовательно, соответствующее значение индуктивного сопротивления рассеяния ротора

$$x_{2\xi н} = x_2\frac{\Sigma\lambda_{2\xi н}}{\Sigma\lambda_2}, \qquad (13\text{-}140)$$

где $\Sigma\lambda_2$ и x_2 — величины, рассчитанные без учета вытеснения тока и насыщения.

Для ротора с двойной клеткой можно считать, что при насыщении изменяется только x_0' вследствие изменения проводимостей рассеяния между усиками зубцов и дифференциального. При этом значение $x_{0н}'$ с учетом насыщения можно определить в соответствии с выбранными формой верхней части паза и выполнением двойной клетки по одной из формул (13-76), (13-76а) с учетом (13-77)—(13-79), но при замене в этих формулах $h_{ш2}/b_{ш2}$ на $(h_{ш2}/b_{ш2} - \Delta\lambda_{2н})$ и $\lambda_{д2}$ на $\lambda_{д2}\varkappa_\delta$.

После того как рассчитаны величины r_1, $r_{2\xi}'$, $x_{1н}$, $x_{2\xi н}$, можно найти параметры короткого замыкания

при учете вытеснения тока и насыщения

$$x_{\text{к}\xi\text{н}} \approx x_{1\text{н}} + x'_{2\xi\text{н}}; \quad r_{\text{к}\xi} \approx r_1 + r'_{2\xi};$$

$$z_{\text{к}\xi\text{н}} \approx \sqrt{r^2_{\text{к}\xi} + x^2_{\text{к}\xi\text{н}}}$$

и определить ток короткого замыкания

$$I_{\text{к.н}} = \frac{U_1}{z_{\text{к}\xi\text{н}}}. \qquad (13\text{-}141)$$

Он не должен отличаться от тока $k_\text{н} I_\text{к}$ [см. (13-122)], который был выбран в начале расчета, больше чем на 15%. В противном случае расчет должен быть повторен.

Приведенный метод учета влияния насыщения на индуктивные сопротивления рассеяния не может считаться обоснованным хотя бы потому, что здесь для полузакрытых и полуоткрытых пазов не учитывается угол наклона граней паза вблизи его открытия относительно касательной к окружности статора или ротора [Л. 103]. Однако при практических расчетах, как показывает опыт, для пазов обычного выполнения им можно пользоваться.

Более точное решение рассматриваемой задачи встречает весьма большие затруднения. По-видимому, его можно было бы получить исходя из распределения общего поля в машине, а не только полей рассеяния. При этом задача должна решаться методом последовательных приближений с помощью современной вычислительной техники.

д) **Учет скоса пазов.** Скошенные пазы на статоре или роторе обычно применяются для короткозамкнутых двигателей. Скос пазов уменьшает шум и паразитные моменты. Однако при этом возрастают индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора, что ведет к понижению пускового и максимального вращающих моментов.

При скошенных пазах несколько возрастает дифференциальное рассеяние, так как высшие гармоники поля в этом случае заглушаются в меньшей степени; по той же причине несколько возрастают добавочные потери в стали при нагрузке.

Вначале напишем некоторые уравнения общей теории асинхронной машины, чтобы обосновать методы учета скоса пазов.

Уравнения напряжений статорной и роторной обмоток могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = j\dot{I}_1 x_{11} + j\dot{I}'_2 x_{12} + \dot{I}_1 r_1; \qquad (13\text{-}142)$$

$$0 = j\dot{I}'_2 x_{22} + j\dot{I}_1 x_{21} + \dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s}, \qquad (13\text{-}143)$$

где x_{11}, x_{22} — полные индуктивные сопротивления статорной и роторной обмоток;

$x_{12} = x_{21}$ — их индуктивное сопротивление взаимной индукции (принимается, что все величины роторной обмотки приведены к обмотке статора).

В соответствии с общепринятым методом исследования электрических машин будем считать, что полные индуктивные сопротивления статора и ротора состоят из индуктивных сопротивлений, обусловленных главными потокосцеплениями и потокосцеплениями рассеяния:

$$x_{11} = x_{1\text{г}} + x_1; \qquad (13\text{-}144)$$

$$x_{22} = x_{2\text{г}} + x'_2. \qquad (13\text{-}145)$$

Величины $x_{1\text{г}}$ и $x_{2\text{г}}$ будем называть главными индуктивными сопротивлениями; они определяются соотношениями:

$$x_{1\text{г}} = \frac{E_{1\text{г}}}{I_{\mu 1}}; \qquad (13\text{-}146)$$

$$x_{2\text{г}} = \frac{E'_{2\text{г}}}{I'_{\mu 2}}, \qquad (13\text{-}147)$$

где $E_{1\text{г}}$ и $E'_{2\text{г}}$ — э.д.с., наведенные в статорной и роторной обмотках главным потоком Ф; $I_{\mu 1}$ и $I'_{\mu 2}$ — намагничивающие токи в тех же обмотках, создающие поток Ф.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции согласно общему определению равно:

$$x_{12} = x_{21} = \frac{E_1}{I'_{\mu 2}} = \frac{E'_2}{I_{\mu 1}}. \qquad (13\text{-}148)$$

Электродвижущая сила E_1 наводится главным потоком Ф роторной обмотки, имеющей ток $I'_{\mu 2}$, а э.д.с. E'_2 — главным потоком Ф статорной обмотки, имеющей ток $I_{\mu 1}$.

При наличии взаимного скоса пазов статора и ротора получим:

$$E_1 = E_{1\text{г}} k_{\text{ск}}; \qquad (13\text{-}149)$$

$$E'_2 = E'_{2\text{г}} k_{\text{ск}}, \qquad (13\text{-}150)$$

где коэффициент скоса пазов $k_{ск}$ учитывает уменьшение э.д.с., наведенной в одной из обмоток главным потоком другой обмотки; его определение аналогично определению обмоточного коэффициента распределения.

На рис. 13-34, *а* представлен паз беличьей клетки, скошенный относительно образующей цилиндрической поверхности ротора, показанной пунктиром; скос (сдвиг) конца косого стержня относительно конца образующей есть $b_с$. Аналогично определяется скос $b_с$ для скошенных пазов статора. При скосе пазов и статора и ротора, если они сделаны в разные стороны, $b_с$ будет равен сумме этих скосов.

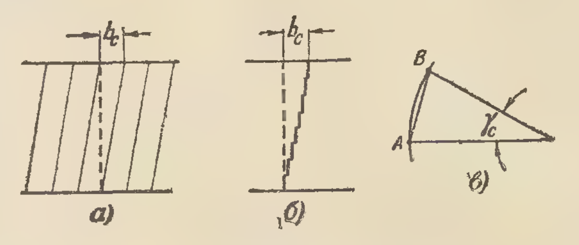


Рис. 13-34. К определению коэффициента скоса пазов.

Представим себе мысленно, что косой стержень заменен очень большим (в пределе бесконечно большим) числом прямых стержней очень малой длины (рис. 13-34, *б*). Векторная сумма э.д.с. этих малых стержней равна э.д.с. всего стержня. Отношение ее к алгебраической сумме тех же э.д.с. и есть коэффициент скоса пазов $k_{ск}$.

В пределе алгебраическая сумма э.д.с. малых стержней равна длине дуги, на которую опираются стороны угла скоса $\gamma_с$, а их векторная сумма — соответствующей хорде $\overline{AB}$ (рис. 13-34, *в*). Угол скоса, очевидно, равен:

$$\gamma_с = \frac{b_с}{\tau}\pi = \frac{2p\pi}{n}, \text{ эл. рад}, \quad (13\text{-}151)$$

где $b_с$ и τ — в сантиметрах или миллиметрах, а $\frac{1}{n} = \frac{b_с}{2p\tau}$; последнее равенство показывает, что скос пазов сделан на $1/n$-ю часть окружности (статора или ротора).

Согласно рис. 13-34, *в* имеем:

$$k_{ск} = \frac{\sin\frac{\gamma_с}{2}}{\frac{\gamma_с}{2}} \approx 1 - \frac{\gamma_с^2}{24} =$$

$$= 1 - 0{,}41\left(\frac{2p}{n}\right)^2. \quad (13\text{-}152)$$

Теперь вернемся к ранее написанным соотношениям (13-146)—(13-150). Из них получим:

$$x_{12}^2 = \frac{E_1}{I'_{\mu2}}\frac{E'_2}{I_{\mu1}} = \frac{E_{1г}E'_{2г}}{I_{\mu1}I'_{\mu2}}k_{ск}^2 =$$

$$= x_{1г}x_{2г}k_{ск}^2 = x_{1г}^2 k_{ск}^2. \quad (13\text{-}153)$$

или

$$x_{12} = x_{1г}k_{ск}. \quad (13\text{-}154)$$

Обратимся к обычной схеме замещения асинхронной машины (рис. 13-35) и найдем ее параметры.

Из этой схемы имеем:

$$\dot U_1 = \dot I_1\left(Z_1 + \frac{Z_{12}Z'_{2s}}{Z_{12}+Z'_{2s}}\right). \quad (13\text{-}155)$$

Из (13-142) и (13-143) с учетом равенства $x_{12}=x_{21}$ следует:

$$\dot U_1 = \dot I_1\left(r_1 + jx_{11} + \frac{x_{12}^2}{\frac{r'_2}{s} + jx_{22}}\right). \quad (13\text{-}156)$$

Подставим сюда (13-144), (13-145) и (13-153), затем на правой стороне вычтем и прибавим $jx_{1г}k_{ск}$ и то же самое сделаем в знаменателе дроби; после этого получим:

$$\dot U_1 = \dot I_1\left(r_1 + jx_1 + jx_{1г} - jx_{1г}k_{ск} + \right.$$

$$+ jx_{1г}k_{ск} +$$

$$\left. + \frac{x_{1г}^2 k_{ск}^2}{\frac{r'_2}{s} + jx'_2 + jx_{2г} - jx_{1г}k_{ск} + jx_{1г}k_{ск}}\right)$$

или после преобразований:

$$\dot U_1 = \dot I_1 \Big\{ r_1 + jx_1 + jx_{1г}(1 - k_{ск}) +$$

$$+\frac{jx_{1г}k_{ск}\left[\frac{r_2'}{s}+jx_2'+jx_{1г}\left(1-k_{ск}\right)\right]}{jx_{1г}k_{ск}+\left[\frac{r_2'}{s}+jx_2'+jx_{1г}\left(1-k_{ск}\right)\right]}\Bigg\}. \quad (13\text{-}157)$$

Сопоставляя (13-155) и (13-157), находим:

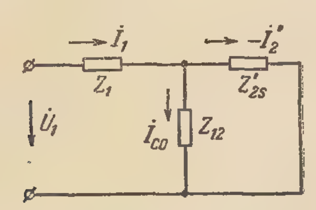


Рис. 13-35. Обычная схема замещения асинхронной машины.

$$\left.\begin{aligned}Z_{12}&=jx_{1г}k_{ск};\\ Z_1&=r_1+jx_1+jx_{1г}(1-k_{ск});\\ Z_{2s}'&=\frac{r_2'}{s}+jx_2'+\\ &+jx_{1г}(1-k_{ск}).\end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}158)$$

Отсюда получаем схему замещения асинхронной машины с учетом скоса пазов, представленную на рис. 13-36. Здесь в ветвь намагничивания включено активное сопротивление r_{12} для учета основных потерь в стали статора, что соответствует примерно такому же допущению, какое делается при построении схемы замещения обычной асинхронной машины; $x_{12}=x_{1г}k_{ск}$.

С физической стороны можно представить себе, что скос пазов влечет за собой потерю потокосцепления, соответствующую величине $x_{1г}(1-k_{ск})$.

Главное индуктивное сопротивление $x_{1г}$ называют также «полезным» индуктивным сопротивлением. Если пользоваться той же терминологией, то при скосе пазов полезным индуктивным сопротивлением следует назвать индуктивное сопротивление $x_{1г}k_{ск}$.

Очевидно, что при увеличении скоса пазов $b_с$ индуктивное сопротивление $x_{12}=x_{1г}k_{ск}$ будет уменьшаться, и при $b_с=2\tau$ оно будет равно нулю, т. е. главный поток, например, статора в этом случае не будет наводить э. д. с. в обмотке ротора. В то же время главный поток статора будет наводить одну и ту же э. д. с. в его обмотке как при скошенных, так и при нескошенных пазах.

Аналогично рассматривается дифференциальное рассеяние, обусловленное высшими гармониками поля, например, статора: полезное индуктивное сопротивление определяется потокосцеплением только от первой гармоники поля, а потокосцепление от высших гармоник поля рассматривается как потеря полного потокосцепления (см. § 7-2, а, п. 2).

Хотя значение $k_{ск}$ близко к единице ($k_{ск}\approx0{,}997\div0{,}993$ при $b_с\approx t_1$), увеличение индуктивных сопротивлений рассеяния из-за

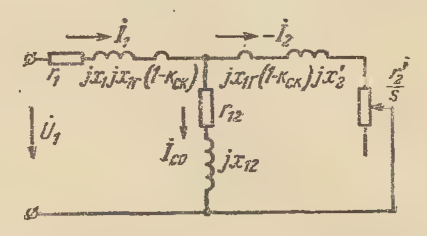


Рис. 13-36. Схема замещения асинхронной машины с учетом скоса пазов.

скоса пазов $x_{1г}(1-k_{ск})$ может составить заметную величину; поэтому не следует брать скос пазов $b_с$ большим (в ряде случаев выбирается $b_с<t_1$).

Практически скос пазов учитывается следующим образом. Индуктивное сопротивление рассеяния статора согласно (13-158)

$$x_1+x_{1г}\left(1-k_{ск}\right)=\sigma_{ск}'x_1; \quad (13\text{-}159)$$

отсюда с учетом (13-152) и (13-146)

$$\sigma_{ск}'=1+\frac{x_{1г}}{x_1}\left(1-k_{ск}\right)=$$

$$=1+0{,}41\left(\frac{2p}{n}\right)^2\frac{U_1-I_{\mu1}x_1}{I_{\mu1}x_1}$$

или

$$\sigma_{ск}'=1+0{,}41\left(\frac{2p}{n}\right)^2\left(\frac{U_1}{I_{\mu1}x_1}-1\right). \quad (13\text{-}160)$$

Для ротора аналогично получим:

$$\sigma_{ск}''=1+0{,}41\left(\frac{2p}{n}\right)^2\times$$

$$\times\left(\frac{U_1}{I_{\mu1}x_2'}-\frac{x_1}{x_2'}\right). \quad (13\text{-}160а)$$

Так как $\frac{U_1}{I_{\mu1}x_1}\approx\frac{U_1}{I_{\mu1}x_2'}$ обычно колеблется в пределах 20—50, то можно практически принять:

$$\sigma_{ск}=\sigma_{ск}'=\sigma_{ск}''=$$

$$=1+0{,}41\left(\frac{2p}{n}\right)^2\varepsilon, \quad (13\text{-}161)$$

где

$$\varepsilon\approx\frac{U_1}{I_{\mu1}x_1}. \quad (13\text{-}162)$$

Таблица 13-9

Значения $\sigma_{ск}$

γ_c, эл.град	ε											
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
10	1,0177	1,024	1,031	1,036	1,043	1,049	1,055	1,062	1,068	1,074	1,081	1,087
12	1,0256	1,0347	1,044	1,053	1,062	1,071	1,080	1,088	1,098	1,107	1,170	1,126
14	1,0347	1,0471	1,059	1,072	1,084	1,097	1,109	1,122	1,134	1,146	1,159	1,171
16	1,045	1,061	1,078	1,094	1,100	1,126	1,142	1,159	1,175	1,192	1,207	1,223
20	1,070	1,096	1,121	1,146	1,172	1,197	1,222	1,247	1,273	1,298	1,324	1,348
25	1,100	1,149	1,189	1,280	1,267	1,307	1,346	1,385	1,424	1,463	1,501	1,540
30	1,159	1,216	1,273	1,330	1,387	1,444	1,500	1,558	1,615	1,671	1,73	1,786
40	1,357	1,485	1,612	1,740	1,868	1,990	2,12	2,25	2,38	2,505	2,63	2,76
50	1,745	2,01	2,27	2,54	2,81	3,07	3,34	3,60	3,87	4,14	4,40	4,66
60	2,15	2,56	2,97	3,38	3,80	4,20	4,62	5,03	5,44	5,85	6,25	6,66

Примечание. При значениях $\sigma_{ск}$, лежащих выше ломаной линии, скос пазов практически можно не учитывать, т. е. считать $\sigma_{ск}=1$.

Следовательно, при учете скоса пазов индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора нужно принять равными $\sigma_{ск}x_1$ и $\sigma_{ск}x_2$. Значения $\sigma_{ск}$ можно брать из табл. 13-9 в зависимости от $\varepsilon=U_1/I_{\mu 1}x_1$ и $\gamma_c=360p/n$, *эл. град*.

е) **Долевые значения параметров асинхронной машины.** После того как определены параметры в омах, целесообразно определить также их долевые значения (выразить их в относительных единицах).

За условную единицу для сопротивлений примем $U_{1н}/I_{1н}$, т. е. отношение номинального фазного напряжения к номинальному фазному току. Следовательно, долевые (относительные) значения активных сопротивлений равны:

$$r_1^* = \frac{I_{1н}r_1}{U_{1н}}; \quad r_2'^* = \frac{I_{1н}r_2'}{U_{1н}};$$

$$r_{12}^* = \frac{I_{1н}r_{12}}{U_{1н}},$$

где r_1, r_2', r_{12} — сопротивления в омах.

Аналогично определяются долевые значения индуктивных сопротивлений:

$$x_1^* = \frac{I_{1н}x_1}{U_{1н}}; \quad x_2'^* = \frac{I_{1н}x_2'}{U_{1н}};$$

$$x_{12}^* = \frac{I_{1н}x_{12}}{U_{1н}}.$$

Долевые значения параметров машин различных мощностей, напряжений и скоростей вращения колеблются в относительно узких пределах, поэтому они позволяют эти машины сравнивать между собой.

При расчете определение их оказывается полезным, потому что мы можем при этом проверить правильность вычислений, а также до некоторой степени правильность выбора размеров и электромагнитных нагрузок проектируемой машины.

Далее приводятся обычные долевые значения параметров нормальных асинхронных машин. Для активных сопротивлений имеем:

$$r_1^* \approx r_2'^* = 0{,}01 \div 0{,}08;$$

здесь высшие значения относятся к малым машинам (около 0,6 *квт*), низшие значения — к большим машинам (на тысячи киловатт). Для машин при $P_н=0{,}4 \div 0{,}03$ *квт* $r_1^* \approx 0{,}12 \div 0{,}20$; $r_2'^* \approx 0{,}08 \div 0{,}12$.

Если r_1^* разделить на $\cos\varphi$, которым задавались в начале расчета, то получим примерно электрические потери в статорной обмотке в долях от номинальной первичной мощности $P_{1н}=m_1U_{1н}I_{1н}\cos\varphi$. Значение $r_2'^*$ приблизительно равно скольжению при номинальной нагрузке, так как $s_н \approx I_{2н}'r_2'/E_2'$.

Обычные долевые значения индуктивных сопротивлений рассеяния

$$x_1^* \approx x_2'^* = 0{,}08 \div 0{,}14\,(0{,}09 \div 0{,}12),$$

(наиболее часто встречающиеся значения поставлены в круглые скобки); здесь высшие значения относятся к машинам с большим числом полюсов; для короткозамкнутых двигателей с глубокими пазами или двойной клеткой на роторе $x_2' \approx \approx (1,1 \div 1,7) x_1$.

Долевые значения сопротивлений ветви намагничивания

$$x_{12}^* = 1,2 \div 4 \, (2,3 \div 4)$$

(низшие значения относятся к машинам с большим числом полюсов, а также к малым машинам при $P < < 0,6$ *квт*); значения для нормальных машин соответственно при $2p = = 10 \div 2$ поставлены в круглые скобки; для нормальных машин при холостом ходе можно приближенно принять $I_0 x_{12} \approx E_1 \approx U_{1н}$ отсюда $x_{12}^* \approx \approx I_{1н}/I_0$;

$$r_{12}^* = 0,35 \div 0,05$$

[значение r_{12}^* зависит согласно (13-47) от основных потерь в стали статора P_{c1} и намагничивающего тока I_μ; оно тем больше, чем относительно больше P_{c1} и меньше I_μ].

Приведенные значения параметров получаются без учета вытеснения тока в стержнях ротора, насыщения зубцов от полей рассеяния и влияния скоса пазов.

13-8. МНОГОСКОРОСТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Многоскоростные двигатели могут иметь на статоре только одну обмотку, позволяющую путем переключения ее частей получить несколько чисел полюсов и, следовательно, несколько скоростей вращения. Такую обмотку принято называть полюсно-переключаемой. Она получается наиболее простой по схеме при переключении чисел полюсов в отношении 2 : 1 и требует в этом случае вывода к переключателю только шести концов. Кривые создаваемых ею полей при обоих числах полюсов могут быть получены достаточно благоприятными. Поэтому полюсно-переключаемые обмотки с отношением чисел полюсов 2 : 1 наиболее часто применяются на практике. В последующем рассматриваются только такие обмотки *.

При другом отношении чисел полюсов, например 3 : 2, 4 : 3, обычно применяются две обмотки на статоре на разные числа полюсов, причем если требуются не две, а три или четыре ступени скорости, то одну или обе обмотки делают полюсно-переключаемыми.

Многоскоростные двигатели выполняются обычно *с короткозамкнутым ротором*. Но если требуется такой двигатель с контактными кольцами, например для более плавного пуска в ход или для добавочного регулирования скорости вращения при помощи реостата в роторной цепи, то на роторе также помещается одна полюсно-переключаемая обмотка или две обмотки на разные числа полюсов. В этом случае ротор двухскоростного двигателя должен иметь шесть или семь контактных колец.

Схемы полюсно-переключаемых обмоток с отношением чисел полюсов 2 : 1 легко могут быть получены при помощи условных схем, рассмотренных в § 4-3.

а) **Полюсно-переключаемая обмотка для отношения скоростей 1 : 2.** Обозначим для полюсно-переключаемой обмотки меньшее число полюсов через $2p_1$, а большее — через $2p_2$, тогда получим $2p_2 = 2 \cdot 2p_1$.

Рассматриваемая обмотка выполняется, как правило, в виде двухслойной петлевой обмотки, так как *однослойная обмотка* дает менее благоприятные кривые полей. Мы здесь также имеем всего $3 \cdot 2p_1$ катушечных групп по q_1 катушек в каждой (при $q_1 =$ целое число), а на фазу $2p_1$ катушечных групп. Каждая фаза делится на две одинаковые части, имеющие по p_1 катушечных групп, причем катушечные группы каждой части располагаются под полюсами одной и той же полярности, т. е. сдвинутыми на два полюсных деления.

Шаг обмотки при $2p_1$ *полюсах*, как правило, выбирается равным полюсному делению при $2p_2$ полюсах.

Удвоенное число полюсов получается при изменении направления тока в одной из двух частей каждой фазы, что делается путем переключения этих частей. Полюсное деление при этом будет равно половине полюсного деления при меньшем числе полюсов.

Так как сторона катушечной группы (имеющая q_1 катушечных сторон) при меньшем числе полюсов $2p_1$ занимает $1/3$ полюсного деления, то при вдвое большем числе полюсов $2p_2$ она будет занимать $2/3$ полюсного деления. В соответствии с этим при $2p_1$ получается обмотка с фазной зоной 60 *эл. град* (шестизонная), а при $2p_2$ — с фазной зоной 120 *эл. град* (трехзонная).

Шаг обмотки с бóльшим числом полюсов выбирается обычно равным полюсному делению, так как кривая н. с. обмотки с фазной зоной 120 *эл. град* при укороченном или удлиненном шаге содержит нежелательные четные гармоники, которые повышают дифференциальное рассеяние и могут вызвать заметное искажение кривой пускового момента и шум машины.

Для примера рассмотрим трехфазную обмотку на четыре и восемь полюсов при $Z_1 = 72$ паза. Полное число катушечных

* Полюсно-переключаемые обмотки, позволяющие получить другие отношения чисел полюсов, частично рассмотрены в [Л. 35 и 105].

групп этой обмотки $6p_1=6 \cdot 2=12$; каждая группа состоит из $72/12=6$ единичных катушек. Шаг обмотки при $2p_1=4$ будет $y_4=\tau_8==6 \cdot 3/2=9(1 \rightarrow 10)$.

На рис. 13-37 показаны 12 катушечных групп и обозначены фазы, к которым они относятся. Рассмотрим фазу A. Из четырех катушечных групп этой фазы (*1, 4, 7, 10*)

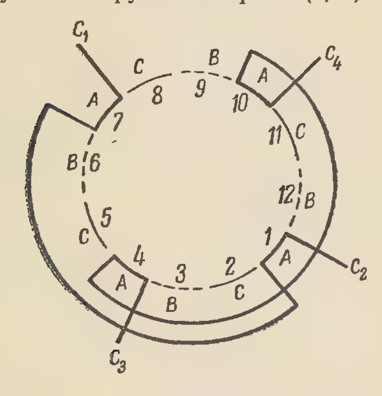


Рис. 13-37. Катушечные группы полюснопереключаемой обмотки на четыре и восемь полюсов (каждая фаза имеет две части; показана только фаза A).

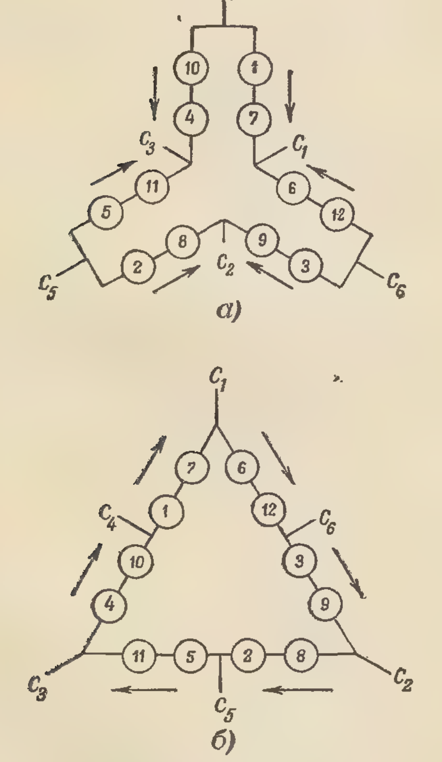


Рис. 13-38. Схема для обмотки на четыре и восемь полюсов (рис. 13-37).

а — соединение YY для высшей скорости ($2p=4$) — к сети зажимы C_4, C_5, C_6; зажимы C_1, C_2, C_3 замкнуты; *б* — соединение Δ для низшей скорости ($2p=8$) — к сети зажимы C_1, C_2, C_3; зажимы C_4, C_5, C_6 разомкнуты.

группы *1* и *7*, расположенные под полюсами одной и той же полярности, соединены последовательно, так же как и группы *4* и *10*, расположенные под полюсами другой полярности. Таким образом, получаются две части на фазу.

На рис. 13-38, *а* показаны соединения этой обмотки в двойную звезду (YY), при которых получаются четыре полюса, так как обмотка в этом случае не отличается от нормальной четырехполюсной обмотки, имеющей две параллельные ветви на фазу. Токи фазы A имеют направления в катушечных группах *1—7* и *10—4* от *1* к *7* и от *10* к *4* соответственно. Большее число полюсов $2p_2=8$ можем получить, соединяя 12 катушечных групп в единичный треугольник

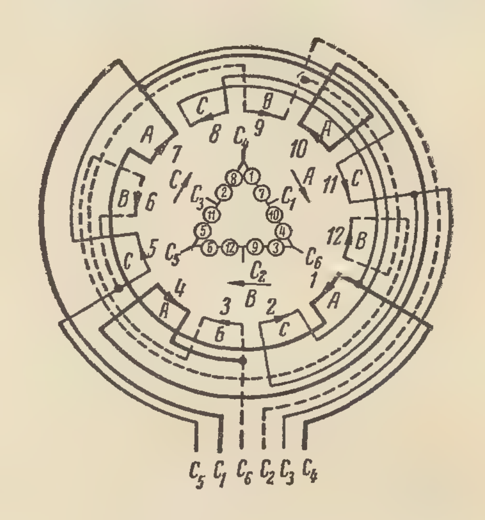


Рис. 13-39. Схема для отношения чисел полюсов 8 : 4 (P=const).

(Δ), как показано на рис. 13-38, *б*. По сравнению с рис. 13-38, *а* здесь токи в катушечных группах *4—10, 6—12, 2—8* имеют обратное направление, вследствие чего получается восемь полюсов.

Соединения YY/Δ по рис. 13-38, *а* и *б* используются для изменения числа полюсов двигателя, который должен иметь один и тот же момент (M=const) при обеих скоростях вращения (например, для привода к воздушному компрессору).

Для двигателя с переменным моментом (M=var), например в случае привода к вентилятору, когда момент должен увеличиваться с возрастанием скорости вращения, применяются соединения YY/Y.

Для двигателя, который должен работать с одинаковой мощностью (P=const) при обеих скоростях вращения (привод к некоторым металлорежущим станкам), применяются соединения Δ/YY.

Три способа соединений двухскоростной обмотки при отношении скоростей 1 : 2 показаны в первом ряду табл. 13-10 и на рис. 13-39—13-44. Следует отметить, что в каждом из соединений число звезд или треугольников может быть удвоено, утроено и т. д. Так, например, для соединений при

M=const можно взять YYYY/ΔΔ вместо YY/Δ (рис. 13-45).

б) Обмотки при отношении скоростей, отличающемся от 1 : 2. При отношении скоростей вращения 2 : 3 или 3 : 4 и т. д. применяются чаще всего две отдельные обмотки. Для небольших двигателей обычно циальное рассеяние, помещается обычно ближе к открытию пазов, чтобы уменьшить ее пазовое рассеяние.

Для больших двигателей обе обмотки укладываются таким образом, чтобы получилось два слоя как для пазовых, так и для лобовых частей. Обмотки получаются как

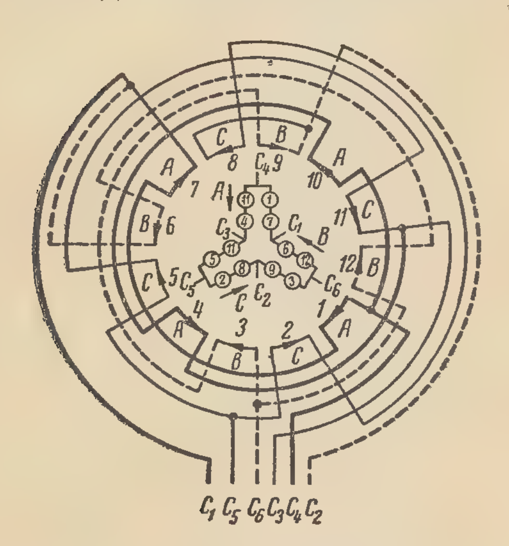


Рис. 13-40. Схема для отношения чисел полюсов 8 : 4 (M=const).

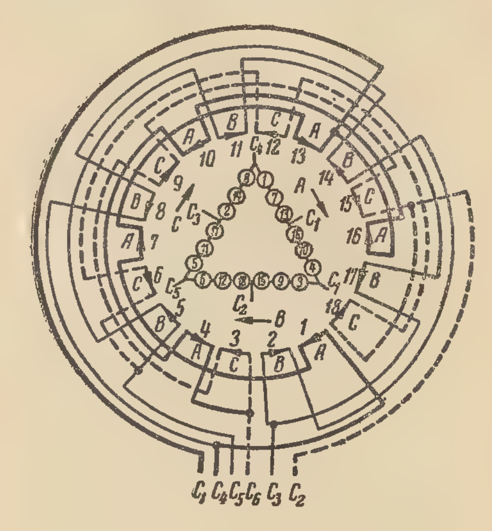


Рис. 13-42. Схема для отношения чисел полюсов 12 : 6 (P=const).

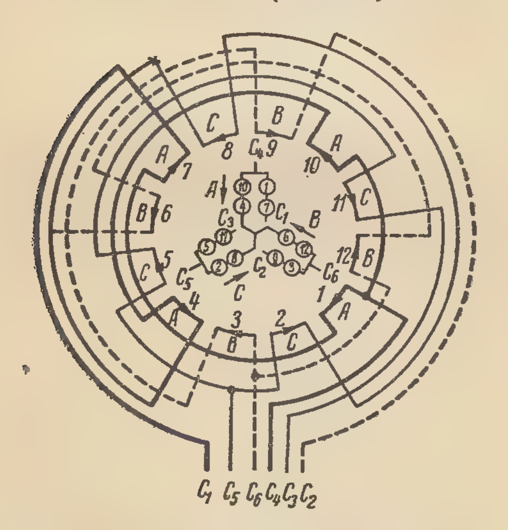


Рис. 13-41. Схема для отношения чисел полюсов 8 : 4 (M=var).

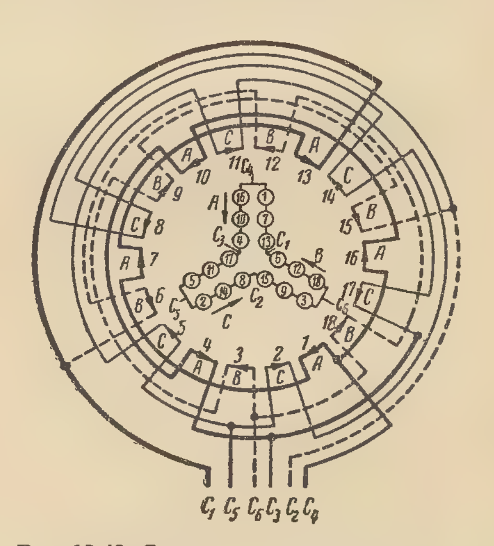


Рис. 13-43. Схема для отношения чисел полюсов 12 : 6 (M=const).

выбираются две нормальные двухслойные петлевые обмотки (при малой мощности также однослойные), которые после укладки их в пазы образуют четыре слоя. При таких обмотках мы можем выбирать наиболее благоприятные шаги для каждой из них, а также их числа витков и сечения проводников в зависимости от заданного отношения мощностей при заданном отношении скоростей вращения. Обмотка на низшую скорость, имеющая повышенное дифференбы встроенными одна в другую. На рис. 13-46 показаны пазы с катушечными сторонами, принадлежащими отдельным обмоткам *I* и *II*. При работе двигателя ток будет проходить только по одной обмотке, но при этом используются все пазы, что уменьшает ступенчатость кривой н. с., а следовательно, и дифференциальное рассеяние. Соединение катушек обеих обмоток делается на противоположных сторонах двигателя. Полное число пазов должно быть четным.

Катушечные стороны обеих обмоток должны иметь приблизительно одинаковые размеры по высоте паза. Шаги обмоток должны быть точно равны друг другу. Так как верхние катушечные стороны обмотки *I* лежат в пазах с нечетными номерами, а такие же стороны обмотки *II* в пазах с четными

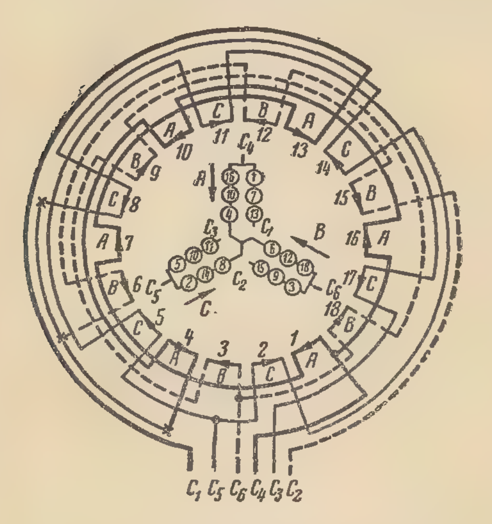


Рис. 13-44. Схема для отношения чисел полюсов 12 : 6 (M=var).

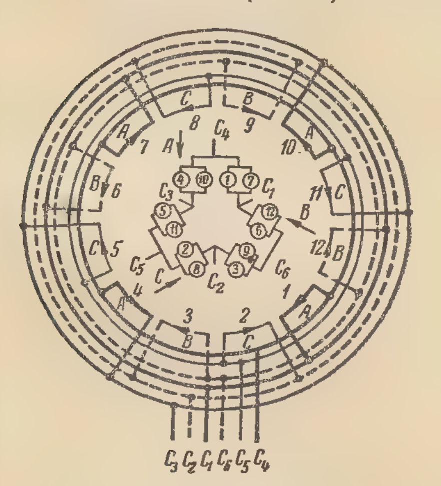


Рис. 13-45. Схема для отношения чисел полюсов 8 : 4 при соединении обмоток YYYY/ΔΔ (M=const).

номерами, то шаг обмотки должен быть равен нечетному числу, чтобы в каждом пазу находились катушечные стороны обеих обмоток. Рассмотрим два примера.

1. Отношение скоростей 3 : 2; следовательно, отношение чисел полюсов 2 : 3. Числа полюсов 8 и 12; число пазов $Z=144$. Полюсное деление 8-полюсной обмотки $\tau_8=144/8=18$, а 12-полюсной обмотки $\tau_{12}=144/12=12$. Выбираем шаг для обеих обмоток $y=13(1\rightarrow 14)$, тогда в долях соответствующего полюсного деления он будет составлять $y/\tau_8=13/18\approx 0{,}722$ и $y/\tau_{12}=13/12\approx 1{,}082$.

2. Отношение скоростей 7 : 5; следовательно, отношение чисел полюсов 5 : 7. Числа полюсов 10 и 14; число пазов $Z=168$. Полюсное деление 10-полюсной обмотки $\tau_{10}=168/10=16{,}8$, а 14-полюсной обмотки $\tau_{14}=168/14=12$. Выбираем шаг $y=13(1\rightarrow 14)$, тогда в долях соответствующего полюсного деления он будет составлять $y/\tau_{10}=13/16{,}8\approx 0{,}774$ и $y/\tau_{14}=13/12\approx 1{,}082$.

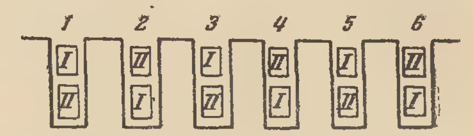


Рис. 13-46. Размещение катушечных сторон двух отдельных обмоток в два слоя для двигателя с отношением скоростей, отличающимся от 1 : 2.

Каждая из обмоток, стороны которых укладываются в два слоя, может иметь целое или дробное число пазов на полюс и фазу. Так как из двух обмоток к сети приключается только одна обмотка, то в это время другая обмотка не должна иметь замкнутых контуров, в которых могли бы образоваться токи: например, если обмотка соединяется в треугольник, то он должен быть разомкнут в одной из вершин; если имеются параллельные ветви (при Y или Δ), то они должны быть разомкнуты в каждой фазе, что требует вывода к переключателю добавочных концов. Поэтому в большинстве случаев обе обмотки проектируются таким образом, чтобы получилось соединение Y или Δ при последовательном включении катушечных групп каждой фазы. Обмотка, соединенная треугольником, во всех случаях, когда она не используется, должна быть разомкнута в одной из вершин, на что указывается в табл. 13-10.

в) Обмотки трехскоростного двигателя. В этом случае на статоре укладываются также две обмотки, но одна из них делается полюсно-переключаемой с отношением чисел полюсов 2 : 1. Катушечные стороны обеих обмоток размещаются в четырех слоях.

Одна обмотка имеет нормальные соединения катушечных групп. Катушечные группы второй полюсно-переключаемой обмотки соединяются в зависимости от заданного соотношения между мощностью и скоростью вращения. Схемы соединений для этого случая приведены в третьем ряду табл. 13-10. Наиболее часто встречаются отношения чисел полюсов: 4/6/8, 6/8/12, 8/12/16 и 12/16/24.

г) Обмотки четырехскоростного двигателя. Здесь также на статоре помещаются две обмотки, но обе они должны быть полюсно-переключаемыми. Типичные отношения чисел полюсов 6/8/12/16.

Соединения обмоток четырехскоростного двигателя для различных отношений между мощностью и скоростью вращения приведены в четвертом ряду табл. 13-10.

Таблица 13-10

Схемы соединений статорных обмоток многоскоростных короткозамкнутых двигателей

Две скорости, одна обмотка, $P = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты	Соединения
Низшая	C_1	C_2	C_3		$C_4C_5C_6$	YY
Высшая	C_6	C_4	C_5	$C_1C_2C_3$		Δ

Две скорости, одна обмотка, $M = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты	Соединения
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие		Δ
Высшая	C_6	C_4	C_5		$C_1C_2C_3$	YY

Две скорости, одна обмотка, $M = \text{var}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты	Соединения
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие		Y
Высшая	C_6	C_4	C_5		$C_1C_2C_3$	YY

Две скорсти, две обмотки (в два слоя), $P = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	$C_{11}C_{12}C_{13}$
Высшая	C_{11}	C_{12}	C_{13}	$C_1C_2C_3$

Две скорсти, две обмотки (в два слоя), $M = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	$C_{11}C_{12}C_{13}C_{17}$
Высшая	C_{11}	C_{12}	$C_{13}C_{17}$	$C_1C_2C_3$

Две скорости, две обмотки (в два слоя), $M = \text{var}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3C_7	$C_{11}C_{12}C_{13}$
Высшая	C_{11}	C_{12}	C_{13}	$C_1C_2C_3C_7$

Три скорости, две обмотки, $P = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие	$C_4C_5C_6C_7$
Средняя	C_6	C_4	C_5C_7		
Высшая	C_{11}	C_{12}	C_{13}		

Три скорости, две обмотки, $M = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3C_7	Все другие	$C_1C_2C_3C_7$
Средняя	C_6	C_4	C_5		
Высшая	C_{11}	C_{12}	C_{13}		

Три скорости, две обмотки, $M = \text{var}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие	$C_1C_2C_3$
Средняя	C_6	C_4	C_5		
Высшая	C_{11}	C_{12}	C_{13}		

Четыре скорости, две обмотки, $P = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие	$C_4C_5C_6C_7$
Вторая	C_{11}	C_{12}	C_{13}		$C_{14}C_{15}C_{16}C_{17}$
Третья	C_6	C_4	C_6C_7		
Высшая	C_{16}	C_{14}	$C_{15}C_{17}$		

Четыре скорости, две обмотки, $M = \text{const}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3C_7	Все другие	$C_1C_2C_3C_7$
Вторая	C_{11}	C_{12}	$C_{13}C_{17}$		$C_{11}C_{12}C_{13}C_{17}$
Третья	C_6	C_4	C_5		
Высшая	C_{16}	C_{14}	C_{15}		

Четыре скорости, две обмотки, $M = \text{var}$

Скорости	$Л_1$	$Л_2$	$Л_3$	Разомкнуты	Замкнуты
Низшая	C_1	C_2	C_3	Все другие	$C_1C_2C_2$
Вторая	C_{11}	C_{12}	C_{13}		$C_{11}C_{12}C_{13}$
Третья	C_6	C_4	C_5		
Высшая	C_{16}	C_{14}	C_{15}		

д) Расчет многоскоростных двигателей. Размеры многоскоростного двигателя всегда больше размеров нормального односкоростного двигателя, рассчитанного на те же наибольшие мощность и скорость вращения, что и первый. Этому в основном две причины. Если применяются две отдельные обмотки, то размеры пазов для них, а следовательно, внешний диаметр статора получаются больше, чем при одной обмотке. Второй причиной является почти всегда худший $\cos\varphi$, а при полюсно-переключаемой обмотке к этому добавляется еще худшее «магнитное использование» из-за низких значений обмоточных коэффициентов.

При двух отдельных обмотках получить заданное отношение мощностей при заданном отношении скоростей вращения обычно не представляет затруднений. При одинаковых затратах меди для каждой обмотки отношение мощностей примерно соответствует отношению скоростей вращения. Однако из-за худшего $\cos\varphi$ (при большем δ/τ) использование машины при низшей скорости будет меньше, чем при высшей; кроме того, делается заметным ухудшение самовентиляции при низшей скорости.

При полюсно-переключаемой обмотке для двух чисел полюсов $2p_1$ и $2p_2$, включаемой на одно и то же напряжение, мощности, соответствующие отдельным числам полюсов, зависят от выбранной схемы включения частей фаз и от сопряжения фаз.

Найдем вначале отношение полных (кажущихся) мощностей как произведений $U_ф I_ф$ при различных включениях обмоток. Это дает первое приближение, при котором мы не учитываем ни $\cos\varphi$, ни к. п. д.

Обозначим искомое отношение через S_2'/S_1':

$$\frac{S_2'}{S_1'}=\frac{\text{Полная мощность при большем числе полюсов } 2p_2}{\text{Полная мощность при меньшем числе полюсов } 2p_1}.$$

Учитывая, что $U_c=\sqrt{3}U_ф$ (U_c — напряжение сети) при включениях Y, YY; $U_c=U_ф$ при включении Δ и что при последовательном соединении частей фазы $I_ф=I$ (I — ток части фазы), а при параллельном $I_ф=2I$, получаем отношения S_2'/S_1' при *различных включениях обмоток, приведенные* в табл. 13-11.

Таблица 13-11

Число полюсов		2 p_2, большее (низшая скорость) Y	YY	Δ
$2p_1$, меньшее (высшая скорость)	Y	1/1	2/1	$\sqrt{3}/1$
	YY	1/2	1/1	$\sqrt{3}/2$
	Δ	$1/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$	1/1

Отношения действительных мощностей получим, если еще учтем отношения $\cos\varphi$ и η (к. п. д.) и, кроме того, уменьшение примерно на 20% тока в обмотке при низшей скорости:

$$\frac{P_2}{P_1}\approx\frac{S_2'}{S_1'}\frac{\cos\varphi_2}{\cos\varphi_1}\frac{\eta_2}{\eta_1}0{,}8\approx\frac{S_2'}{S_1'}\ (0{,}6\div0{,}8).$$

Данное соотношение и табл. 13-11 позволяют установить, что для получения п о с т о я н н о й м о щ н о с т и при обеих скоростях вращения следует выбрать соединения YY и Δ (см. табл. 13-10, первый ряд, соединения A), при которых $S_2'/S_1'=2/\sqrt{3}$, но иногда выбираются также одинаковые соединения для обоих чисел полюсов, при которых $S_2'/S_1'=1/1$; для получения п о с т о я н н о г о м о м е н т а, когда отношение мощностей должно равняться отношению скоростей вращения, следует выбрать соединения Δ и YY (там же, соединения B) *или иногда* Y *и* Δ; *для получения* п е р е м е н н о г о м о м е н т а, возрастающего со скоростью (привод к вентилятору), следует выбрать соединения Y и YY (там же, соединения C).

Р а с ч е т м а г н и т н о й ц е п и при полюсно-переключаемой обмотке производится так же, как для нормальных машин. При определении магнитных потоков для обоих чисел полюсов следует иметь в виду относительно низкие значения обмоточных коэффициентов.

Для обмотки с $2p_1$ полюсами шаг $y=0{,}5\,\tau$ и коэффициент укорочения $k_y=0{,}707$, коэффициент распределения в среднем $k_p=0{,}96$; обмоточный коэффициент при $2p_1$, следовательно, $k_{o1}=0{,}96\cdot0{,}707=0{,}68$. Для обмотки с $2p_2$ полюсами $k_y=1$; обмоточный коэффициент при учете, что фазная зона занимает 120 *эл. град*, а не 60, равен $k_{o2}=0{,}96\cdot0{,}866=0{,}83$. Более точные значения обмоточных коэффициентов приведены в табл. 13-12.

Таблица 13-12

Большее число полюсов 2 p_2: q_2	k_{o2}	Меньшее число полюсов 2 p_1: q_1	k_{o1}
1	0,866	2	0,683
2	0,836	4	0,677
3	0,831	6	0,676
4	0,829	8	0,676
5	0,828	10	0,676
6	0,827	12	0,675

Отношения потоков при различных включениях обмоток A, B, C (табл. 13-10, первый ряд) с учетом средних значений обмоточных коэффициентов имеют следующие значения:

при включении		A	B	C
отношение потоков	$\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$	$\frac{1}{1{,}05}$	$\frac{1}{1{,}41}$	$\frac{1}{2{,}42}$

Отношения индукций в ярмах равны отношениям потоков, так как при каждом числе полюсов сечения ярм остаются неизменными. Размеры ярм статора и ротора нужно рассчитывать для наибольшего потока, который получается при меньшем числе полюсов при любом из трех включений *A*, *B*, *C*.

Отношения индукций в воздушном зазоре и в зубцах, если пренебречь небольшим изменением коэффициента уплощения $a_б$, отличаются от отношения потоков. При переходе от меньшего числа полюсов к удвоенному полюсное деление уменьшается в 2 раза, так же как и число зубцов на полюс. Поэтому отношения индукций в воздушном зазоре и зубцах в 2 раза больше отношений потоков. Следовательно, имеем:

при включении		*A*	*B*	*C*
отношение индукций в ярмах	$\frac{B_{c,p2}}{B_{c,p1}}=$	$\frac{1}{1,05}$	$\frac{1}{1,41}$	$\frac{1}{2,42}$
отношение индукций в воздушном зазоре и в зубцах	$\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}=\frac{B_{z2}}{B_{z1}}=$	$\frac{1}{0,52}$	$\frac{1}{0,707}$	$\frac{1}{1,21}$

Мы видим, что индукции в воздушном зазоре и зубцах при включениях *A* и *B* наибольшие при низшей скорости вращения, а при включении *C* — при высшей скорости вращения.

Расчет активных сопротивлений можно производить по ранее приведенным формулам (§ 7-1); при этом следует иметь в виду, что активное сопротивление части кольца между стержнями беличьей клетки, приведенное к сопротивлению стержня (сопротивление последнего остается неизменным), будет при $2p_1$ практически в 4 раза больше, чем при $2p_2$ [см. (7-14) и (7-15)].

Для расчета коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния можно пользоваться в соответствии с выбранной формой паза статора при $2p_1$ формулами (7-23)—(7-26), а при $2p_2$ — теми же формулами, но коэффициенты k_β и k'_β здесь должны быть заменены значениями $k_\beta=\frac{1}{4}+\frac{3}{4}k'_\beta$ и $k'_\beta=\frac{3}{4}$ при $\frac{2}{3}\leqslant\beta\leqslant 1$ или $k'_\beta=\frac{9}{8}$ при $0<\beta\leqslant\frac{2}{3}$ (если $1<\beta\leqslant 2$, то вместо β следует взять $2-\beta$). Коэффициент $\lambda_д$ с некоторым приближением рассчитывается при обоих числах полюсов так же, как для нормальной обмотки, имеющей фазную зону 60 *эл. град* и полный (неукороченный) шаг. Коэффициент $\lambda_л$ рассчитывается при $2p_1$ по обычным формулам, при $2p_2$ по (7-45), где вместо 0,34 нужно подставить 0,26.

Отметим, что коэффициенты приведения параметров обмотки ротора к обмотке статора будут различными для обоих чисел полюсов.

Возвращаясь к вопросу выбора размеров многоскоростного двигателя, следует отметить, что здесь не представляется возможным дать какие-либо определенные и точные указания. Можно лишь указать, что размеры многоскоростного двигателя предварительно должны выбираться для тех значений мощности и скорости вращения, которые для нормальных машин потребовали бы наибольших размеров; при этом для двигателя с полюсно-переключаемой обмоткой нужно учесть худшее «магнитное использование» (низкие значения обмоточных коэффициентов) машины, а для двигателя с двумя отдельными обмотками — то, что одна из обмоток не используется, но требует увеличения размеров паза для ее размещения.

При заводских расчетах, когда необходимо использовать размеры и нормали существующих серий, приходится обычно брать типоразмер машины, примерно второй за типоразмером, соответствующим указанным мощности и скорости вращения.

Мы уже отметили, что многоскоростные двигатели, как правило, выполняются с короткозамкнутым ротором. Ротор часто выполняется с глубокими пазами или с двойной клеткой. При выборе для него числа пазов можно руководствоваться ранее приведенной табл. 13-7. Применяется также скос пазов статора или ротора.

Рекомендуется рассчитывать машину, производя расчеты параллельно для заданных мощностей и соответствующих им скоростей вращения.

13-9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ И ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

а) **Рабочие характеристики.** После того как выбраны размеры и обмотки двигателя, рассчитаны его параметры, намагничивающий ток, потери в стали и механические, необходимо найти величины, характеризующие номинальный режим его работы. Они находятся при помощи круговой диаграммы или аналитически (без круговой диаграммы). При этом определяются также рабочие характеристики двигателя.

1. *Круговая диаграмма.* Построение круговой диаграммы можно произвести на основе схемы замещения, представленной на рис. 13-47.

Она получается путем простого преобразования схемы на рис. 13-16 [Л. 12].

На рис. 13-47 $\dot{I}_c$ — ток при синхронной скорости вращения ($s=0$); $Z_1=r_1+jx_1$; $Z_{12}=r_{12}+jx_{12}$; C_1 — комплексный коэффициент:

$$C_1=1+\frac{Z_1}{Z_{12}}=c_1e^{j\gamma_1}=$$

$$=c_1(\cos\gamma_1+j\sin\gamma_1),$$

где

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1+r_{12})^2 + (x_1+x_{12})^2}{r_{12}^2 + x_{12}^2}}; \quad (13\text{-}163)$$

$$\gamma_1 = \operatorname{arctg} \frac{r_{12}x_1 - r_1x_{12}}{r_{12}(r_1+r_{12}) + x_{12}(x_1+x_{12})}. \quad (13\text{-}164)$$

Обычно угол γ_1 по абсолютной величине меньше 2°, поэтому можно считать $\gamma_1 \approx \operatorname{tg}\gamma_1$. В большинстве случаев $\gamma_1 < |1°|$; тогда им можно пренебречь; только для небольших двигателей при относительно боль-

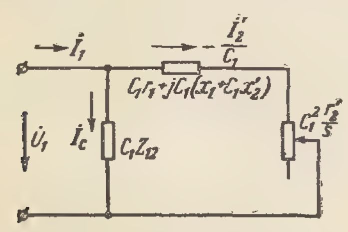


Рис. 13-47. Преобразованная схема замещения асинхронной машины.

шом значении r_1 и малых потерях в стали P_{c1} угол γ_1 может оказаться бо́льшим $|1°|$, обычно имеющим отрицательное значение. Малые двигатели при $P_н < 1$ *квт* могут иметь значение r_1 в относительных единицах 0,1—0,25, а значение угла $\gamma_1 = 5$—15°. В этом случае диаметр круговой диаграммы и положение линии электромагнитных вращающих моментов следует определить при помощи более точных формул, приведенных далее в квадратных скобках.

Для построения круговой диаграммы необходимо рассчитать следующие величины:

1) параметры

$$c_1x_1;\ c_1^2x_2';\ c_1r_1;$$

$$[r_1'' = c_1(r_1\cos\gamma_1 + x_1\sin\gamma_1)];\ c_1^2r_2';$$

$$x_к' = c_1x_1 + c_1^2x_2';$$

$$[x_к'' = c_1(x_1\cos\gamma_1 - r_1\sin\gamma_1) + c_1^2x_2'];$$

$$r_к' = c_1r_1 + c_1^2r_2';\quad [r_к'' = r_1'' + c_1^2r_2'],$$

где

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}};\ [c_1 \text{ по } (13\text{-}163)];$$

2) ток холостого хода и $\cos\varphi_0$

$$I_0 \approx \sqrt{I_\mu^2 + I_{0a}^2},$$

где $I_{0a} = P_0/3U_1$ (P_0 — потери холостого хода, *вт*);

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0};$$

3) электрические потери в обмотке статора при холостом ходе

$$P_{э0} = 3I_0^2r_1 \cdot 10^{-3}\ квт;$$

4) основные потери в стали статора P_{c1};

5) потери холостого хода без механических потерь $P_{мех}$ и добавочных потерь в стали $P_{с.д}$:

$$P_0' = P_{э0} + P_{c1};$$

6) диаметр окружности тока

$$D_к = \frac{U_1}{x_к'},\ a;\quad \left[D_к = \frac{U_1}{x_к''},\ a\right]$$

и

$$\frac{D_к}{C_I},\ мм,$$

где C_I, *а/мм* — масштаб для тока, который обычно выбирается так, чтобы диаметр $D_к/C_I$ был равен 150—250 *мм*;

7) масштаб для мощности $C_P = 3U_1C_I \cdot 10^{-3}$ *квт/мм*.

Построение круговой диаграммы рекомендуется производить в следующем порядке (рис. 13-48):

а) по оси абсцисс отложить $\overline{O_1O_2} = I_0/C_I$, *мм*

$$\left[\overline{O_1O_2} = \frac{I_{с.р}}{C_I},\ мм,\right.$$

$$\left.\text{где } I_{с.р} = \frac{U_1(x_1+x_{12})}{(r_1+r_{12})^2 + (x_1+x_{12})^2},\ a\right];$$

б) перпендикулярно оси абсцисс вверх от точки O_2 провести

$$\overline{O_2A_0'} = \frac{P_0'}{C_P},\ мм;$$

в) из точки A_0' провести прямую, параллельную оси абсцисс, и сделать на ней засечку радиусом

100 *мм* (из точки A'_0 как центра) в точке B;

г) провести перпендикулярно к оси абсцисс отрезок

$\overline{BR}=100\cdot 2\,\mathrm{tg}\,\gamma_1$, где $\mathrm{tg}\gamma_1$—по (13-164)

$$[\overline{BR}=100\,\mathrm{tg}\cdot 2\gamma_1];$$

д) через точки A'_0 и R провести прямую, отложить на ней диаметр окружности

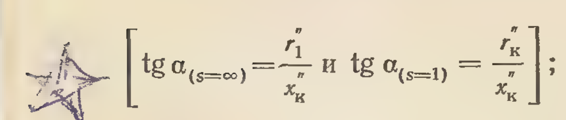
$$\overline{A'_0D}=\frac{D_к}{C_I},\ мм$$

и описать окружность на этом диаметре;

е) из точки R' ($\overline{A'_0R'}=100$ *мм*) провести прямую $R'F$ перпендикулярно диаметру $\overline{A'_0D}$;

ж) на прямой $R'F$ отложить отрезки $\overline{R'F'}=100\ \mathrm{tg}\,\alpha_{(s=\infty)}$ и $\overline{R'F''}=100\ \alpha_{(s=1)}$, где

$$\mathrm{tg}\,\alpha_{(s=\infty)}=\frac{c_1 r_1}{x'_к}\ \text{и}\ \mathrm{tg}\,\alpha_{(s=1)}=\frac{r'_к}{x'_к}$$



$$\left[\mathrm{tg}\,\alpha_{(s=\infty)}=\frac{r''_1}{x''_к}\ \text{и}\ \mathrm{tg}\,\alpha_{(s=1)}=\frac{r''_к}{x''_к}\right];$$

з) через точку A'_0 и точки F' и F'' провести прямые до пересечения с окружностью в точках $A_{(s=\infty)}$ и $A_{(s=1)}$ (полученные линии представляют собой: $A'_0A_{(s=\infty)}$ — линию электромагнитных мощностей или вращающих моментов, $A'_0A_{(s=1)}$ — линию механических мощностей, развиваемых ротором);

и) из середины отрезка $\overline{A'_0A_{(s=\infty)}}$ провести перпендикулярную к нему линию до пересечения с окружностью в точке $A_м$ (отрезок $\overline{A'_мA_м}$, перпендикулярный диаметру, дает максимальный вращающий момент без учета вытеснения тока в проводниках обмотки ротора и насыщения от полей рассеяния);

к) радиусом, равным 100 *мм*, провести дугу для определения $\cos\varphi$;

л) на линии, перпендикулярной оси абсцисс, отложить отрезок $\overline{O_2A_0}=P_0/C_P$, *мм* (таким образом определяется точка холостого хода A_0).

Для определения величин номинального режима выбираем произвольно на линии механических мощностей ротора $A'_0A_{(s=1)}$ точку P' и проводим из этой точки перпендикуляр к диаметру $\overline{A'_0D}$. На нем откладываем отрезок

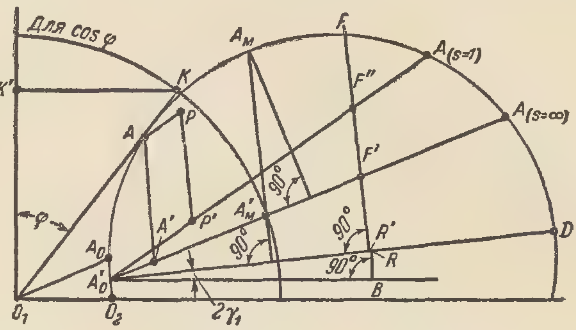


Рис. 13-48. Построение круговой диаграммы.

$$\overline{PP'}=\frac{P_н+P_{мех}+P_{с.д}+P_{доб}}{C_P},\ мм,$$

где $P_{мех}$ — механические потери;

$P_{с.д}$ — пульсационные и поверхностные потери в зубцах статора и ротора;

$P_{доб}$ — добавочные потери при нагрузке, которые можно с достаточным приближением принять равными 0,005 $P_н/\eta$ (η — к.п.д., выбранный в начале расчета).

Проведя через точку P линию, параллельную $A'_0A_{(s=1)}$, получим точку A, приближенно соответствующую номинальному режиму. Таким образом, определяется ток статора $I_1=\overline{O_1A}C_I$, $\cos\varphi=\overline{O_1K'}/100$ и ток ротора $I'_2=\overline{A'_0A}c_1C_I$.

Теперь можно рассчитать первичную мощность $P_1=3U_1I_1\cos\varphi\times\times10^{-3}$ *квт*, потери $P_{э1}=3I_1^2r_1\cdot 10^{-3}$ *квт*, $P_{э2}=3I_2'^2r'_2\cdot 10^{-3}$ *квт*, $P_{доб}=0{,}005\,P_1$, *квт*, которые вместе с ранее найденными $P_{с1}$, $P_{с.д}$, $P_{мех}$ позволяют определить общие потери ΣP.

Отсюда находим к.п.д. $\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$ и вторичную мощность $P_2 = P_1 - \Sigma P$. Последняя обычно мало отличается от заданной мощности $P_н$. Поэтому номинальный ток статора $I_{1н}$ можно определить, используя найденные $\cos \varphi$ и η, по формуле

$$I_{1н} = \frac{P_1}{3U_1 \cos \varphi},$$

где

$$P_1 = \frac{P_н}{\eta}.$$

Так как здесь принято, что η и $\cos \varphi$ остаются неизменными при изменении мощности от P_2 до $P_н$, то номинальный ток можно также определить по формуле

$$I_{1н} = I_1 \frac{P_н}{P_2}.$$

Скольжение при номинальной нагрузке определяется по соотношению

$$s_н = \frac{P_{э2}}{P_{эм}},$$

где $P_{э2}$ — электрические потери в обмотке ротора при номинальном токе

$$I'_{2н} = I'_2 \frac{I_{1н}}{I_1};$$

$P_{эм}$ — электромагнитная мощность при номинальной нагрузке,

$$P_{эм} = P_{1н} - P_{э1} - P_{c1},\ квт$$

(здесь $P_{э1}$ — электрические потери в обмотке статора при номинальном токе $I_{1н}$).

Способность к перегрузке определяется кратностью максимального вращающего момента по отношению к номинальному

$$\frac{M_м}{M_н} = \frac{\overline{A'_м A_м}}{\overline{A' A}},\ \text{или}\ \frac{M_м}{M_н} = \frac{\overline{A'_м A_м}\, C_P}{P_{эм}}.$$

В действительности кратность $M_м/M_н$ получается больше, чем дает приведенное соотношение, приблизительно в 1,15—1,30 раза, что объясняется влиянием насыщения зубцов статора и ротора от полей рассеяния при токах, соответствующих $M_м$.

Согласно ГОСТ 186-52 отношение $M_м/M_н$ для двигателей защищенного и закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором и для двигателей защищенного исполнения с фазным ротором мощностью от 0,6 до 100 *квт* (при $2p=4$) в зависимости от скорости вращения не должно быть меньше значений, указанных в табл. 13-13а.

В новых сериях А2 и АО2 сохранены те же значения $M_м/M_н$. Для двигателей АО2 на мощности 17, 22, 30, 40 *квт* при 600 *об/мин* $M_м/M_н = 1{,}7$.

Таблица 13-13а

Скорость вращения (синхронная), *об/мин*	3000	1500	1000	750
Отношение $M_м/M_н$	2,2	2	1,8	1,7

Для малых двигателей мощностью от 50 до 600 *вт* согласно ГОСТ 8212-56 $M_м/M_н$ должно соответствовать табл. 13-13б.

Таблица 13-13б

Мощность, *вт*	$M_м/M_н$ — Скорость вращения (синхронная), *об/мин*: 3000	1500
50	1,7	1,7
80	1,7	1,7
120	1,7	2,0
180	2,0	2,0
270	2,2	2,0
400	2,2	2,0
600	2,2	—

Примечание. Для меньших мощностей $M_м/M_н$ снижается до 1,5.

Согласно ГОСТ 9362-60 для двигателей с короткозамкнутым или фазным ротором значение $M_м/M_н$ в зависимости от мощности и скорости вращения должно соответствовать табл. 13-13в.

Для двигателей мощностью свыше 1 000 *квт* при 3 000 *об/мин* $M_м/M_н = 2{,}1$, для прочих двигателей на другие скорости вращения — 1,8.

Таблица 13-13в

Мощность, *квт*	Отношение максимального вращающего момента к номинальному $M_м/M_н$					
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	3000	1500	1000	750	600	500
До 200	2,0	2,0	1,9	1,9	1,7	1,7
Более 200 до 1000	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7
1250	—	1,9	—	—	—	—

Для определения рабочих характеристик I_1, η, $\cos\varphi$, $s=f(P_2)$ из круговой диаграммы следует брать токи статора и ротора I_1 и I_2' и соответствующие им значения $\cos\varphi_1$ в пределах от холостого хода (точка A_0) до нагрузки, примерно равной $1{,}25\,P_н$. При этом достаточно взять на диаграмме пять-шесть точек. Далее расчетом, как указано выше, для каждой точки определяются P_1, ΣP, P_2, η, s, причем согласно основному ГОСТ следует принять при номинальной мощности добавочные потери $P_{доб}=0{,}005\,P_{1н}$, а при других мощностях они должны быть пересчитаны пропорционально квадрату тока.

По найденным величинам производится построение рабочих характеристик (§ 13-10, рис. 13-55).

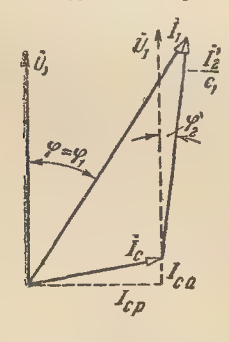


Рис. 13-49. К расчетному определению рабочих характеристик двигателя.

2. *Аналитический метод*. Формулы для расчетного определения рабочих характеристик составляются на основе схемы замещения на рис. 13-47 и соответствующей ей векторной диаграммы на рис. 13-49. При этом должны быть известны:

$$r_1,\ r_2,\ x_1,\ x_2',\ x_{12};\ c_1\approx 1+\frac{x_1}{x_{12}};$$

$$I_{с.р}\approx I_\mu;\ I_{с.а}\approx\frac{P_{с1}\cdot 10^3+3I_\mu^2\,r_1}{3U_1}$$

(реактивная и активная составляющие тока при синхронной скорости вращения); $P_{с1}$, $P_{с.д}$, $P_{мех}$.

Расчеты рекомендуется производить в порядке, указанном в табл. 13-14.

Обычно можно принять угол $\gamma_1=0$; тогда $C_1=c_1\approx 1+\frac{x_1}{x_{12}}$ и в формулах табл. 13-14 получим: $a'=c_1^2$; $b'=0$; $a=c_1r_1$; $b=c_1x_1+c_1^2x_2'$. Если необходимо учесть угол γ_1 (например, при $\gamma_1>3\div4°$), то следует взять комплексный коэффициент $C_1=c_1e^{j\gamma_1}$ и определить для него модуль c_1 по (13-163) и аргумент γ_1 по (13-164); тогда получим:

$$a'=c_1^2\cos 2\gamma_1;\ b'=c_1^2\sin 2\gamma_1;$$

$$a=c_1\,(r_1\cos\gamma_1-x_1\sin\gamma_1-$$
$$-c_1x_2'\sin 2\gamma_1);$$

$$b=c_1\,(x_1\cos\gamma_1+r_1\sin\gamma_1+$$
$$+c_1x_2'\cos 2\gamma_1).$$

При определении добавочных потерь $P_{доб}$ можно принять $P_{1н}=P_{2н}/\eta$, где η — к.п.д., которым задавались в начале расчета.

При расчетах по приведенным в таблице формулам нужно задаваться значениями скольжения примерно в пределах $s=(0{,}2\div1{,}3)s_н$, где номинальное скольжение $s_н$ можно предварительно определить по формуле

$$s_н\approx\frac{I_2'\,r_2'}{E_1}; \qquad (13\text{-}165)$$

здесь ток I_2' известен из расчета двигателя, при котором вначале выбираются $\cos\varphi$ и η; $E_1\approx U_1-I_\mu x_1$. Достаточно произвести расчеты для пяти-шести значений скольжения, выбирая их приблизительно через равные интервалы.

После того как по рассчитанным точкам построены кривые I_1, $\cos\varphi_1$, η, s, $I_2'=f(P_2)$, определяются номинальные величины, соответствующие

Таблица 13-14

Расчеты для определения рабочих характеристик

№ пункта	Формулы	s_1	$s_2\cdots$
1	$a' \dfrac{r_2'}{s}$		
2	$b' \dfrac{r_2'}{s}$		
3	$R = a + a' \dfrac{r_2'}{s}$		
4	$X = b + b' \dfrac{r_2'}{s}$		
5	$z = \sqrt{R^2 + X^2}$		
6	$\cos \varphi_2' = \dfrac{R}{z}$		
7	$\sin \varphi_2' = \dfrac{X}{z}$		
8	$I_2'' = \dfrac{U_1}{z}$		
9	$I_2' = c_1 I_2''$		
10	$I_{1a} = I_{c.a} + I_2'' \cos \varphi_2'$		
11	$I_{1p} = I_{c.p} + I_2'' \mathrm{cin}\, \varphi_2'$		
12	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$		
13	$\cos \varphi_1 = \dfrac{I_{1a}}{I_1}$		
14	$P_1 = 3U_1 I_{1a} \cdot 10^{-3}$		
15	$P_{э1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$		
16	$P_{э2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$		
17	$P_0'' = P_{c1} + P_{c.д} + P_{мех}$		
18	$P_{доб} = 0{,}005\, P_{1н} \left(\dfrac{I_1}{I_{1н}}\right)^2$		
19	$\Sigma P = P_{э1} + P_{э2} + P_0'' + P_{доб}$		
20	$\eta = 1 - \dfrac{\Sigma P}{P_1}$		
21	$P_2 = P_1 - \Sigma P$		

номинальной мощности $P_{2н}$ (§ 13-10, рис. 13-55).

Расчетным путем можно также определить кратность максимального вращающего момента по соотношению

$$\frac{M_м}{M_н} = \left(\frac{I_{2м}'}{I_{2н}'}\right)^2 \frac{s_н}{s_к}, \qquad (13\text{-}166)$$

которое получается из равенств

$$M_м = \frac{m_1 I'^2_{2м} r_2'}{\omega_1 s_к} \text{ и } M_н = \frac{m_1 I'^2_{2н} r_2'}{\omega_1 s_н}.$$

Здесь критическое скольжение

$$s_к = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \approx \frac{r_2'}{\dfrac{x_1}{c_1} + x_2'} \qquad (13\text{-}167)$$

[при относительно больших значениях r_1 и γ_1

$$s_к = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 - 2c_1 x_2' r_1 \sin \gamma_1}}];$$

$I_{2м}'$ — приведенный ток ротора, рассчитанный по формулам пп. 1—9 табл. 13-14 для скольжения $s_к$; номинальные значения $I_{2н}'$ и $s_н$ берутся из построенных рабочих кривых.

При таком определении $M_м/M_н$ мы не учитываем ни вытеснения тока в стержнях ротора, ни насыщения от полей рассеяния. Вытеснением тока при критическом скольжении во многих случаях можно пренебречь. Но токи статора и ротора при этом скольжении обычно получаются в 2,5—4,0 раза больше номинальных, и потому влияние насыщения на x_1 и x_2' здесь сказывается заметным образом. Для первого приближения примем:

$$I_{2м.н}' = k_{м.н} I_{2м}',$$

где $I_{2м.н}'$ — ток при $s_{к.н}$ с учетом насыщения;

$I_{2м}'$ — ток при $s_к$ без учета насыщения;

$k_{м.н} = 1{,}1 \div 1{,}2$ (больше при полузакрытых пазах статора).

Теперь можно по формулам § 13-7, г найти $x_{1н}$ и $x_{2н}'$ (без учета вытеснения) и, подставив найденные значения в (13-167) вместо x_1 и x_2', определить $s_{к.н}$; далее для $s_{к.н}$ нужно рассчитать $I_{2м.н}'$ по пп. 1—9 табл. 13-14, также заменив в формулах x_1 и x_2' на $x_{1н}$ и $x_{2н}'$ (при этих расчетах можно

принять $c_1 = 1$). Если удачно выбран коэффициент $k_{м.н}$ (различие получилось не больше 15%), то можно второго приближения не делать. Кратность максимального момента с учетом насыщения приближенно найдем по (13-166), заменив здесь $I'_{2м}$ на $I'_{2м.н}$ и $s_к$ на $s_{к.н}$.

Насыщение зубцов от полей рассеяния повышает $M_м/M_н$ обычно на 15—30%.

Для малых двигателей, имеющих низкий $\cos\varphi$ и относительно большое значение r_1, намагничивающий ток I_μ при нагрузке заметно уменьшается; при этом вследствие уменьшения насыщения увеличивается x_{12}. Можно найти I_μ при нагрузке, рассчитав магнитную цепь машины для потока, соответствующего э.д.с.

$$E_1 = \sqrt{(U_1 \sin\varphi - I_{1н} x_1)^2 + (U_1 \cos\varphi - I_{1н} r_1)^2},$$

и после этого определить x_{12} и r_{12} по найденным значениям э.д.с. E_1 и потока. В этом случае определение номинальных величин по круговой диаграмме или аналитическим методом следует производить, используя величины $I_{с.а}$, $I_{с.р} \approx I_\mu$, x_{12}, r_{12}, рассчитанные с учетом изменения насыщения.

б) **Пусковые характеристики.** Основными величинами, характеризующими пусковые свойства короткозамкнутого двигателя, являются начальный пусковой момент и начальный пусковой ток, а также минимальный момент, получающийся в процессе пуска двигателя. Снижение последнего, обусловленное в основном неудачным выбором отношения чисел пазов статора и ротора, может оказаться недопустимым.

Начальные пусковые момент и ток могут быть приближенно рассчитаны по приведенным в последующем формулам. Методы расчета минимального момента слишком сложны и недостаточно надежны. Опыты показывают, что его значение при правильном выборе числа пазов ротора Z_2 (§ 13-5,б, п. 1) не получаются ниже допустимого.

Большое практическое значение имеют также пусковые характеристики, представляющие собой зависимости пусковых момента и тока от скольжения или скорости вращения. Их определяют для короткозамкнутого двигателя, чтобы проверить правильность выбора размеров и формы пазов ротора.

Согласно ГОСТ 186-52 отношение начального пускового момента вращения к номинальному $M_{нач}/M_н$ для двигателей защищенного и закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором мощностью от 0,6 до 100 *квт* в зависимости от мощности и скорости вращения должно соответствовать табл. 13-15, а отношение начального пускового тока к номинальному $I_{нач}/I_н$ для тех же двигателей — табл. 13-16.

Таблица 13-15

Мощность, *квт*	Отношение начального момента к номинальному							
	Двигатели защищенного исполнения				Двигатели закрытого обдуваемого исполнения			
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*							
	3000	1500	1000	750	3000	1 500	1000	750
0,6	—	1,7	—	—	2,0	1,7	—	—
1,0	1,8	1,8	1,3	—	2,0	1,8	1,3	—
1,7	1,8	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
2,8	1,6	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
4,5	1,6	1,4	1,3	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
10	1,5	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
14	1,2	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
20	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
28	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
40	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,3
55	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
75	1,0	1,0	1,0	—	1,1	1,1	1,2	—
100	1,0	1,0	—	—	1,0	1,1	—	—



Для современных двигателей серий А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 *квт* значения $M_{нач}/M_н$ и $I_{нач}/I_н$ соответствуют табл. 13-15 и 13-16.

Таблица 13-16

Мощность, *квт*	Отношение начального тока к номинальному			
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*			
	3000	1500	1000	750
От 0,6 до 28 включительно	7	7	6,5	5,5
От 40 до 100 включительно	6,5	6,5	6,5	5,5

Отношение минимального момента в процессе пуска к номинальному не должно быть меньше 0,8.

Согласно ГОСТ 9362-60 значения $M_{нач}/M_н$ и $I_{нач}/I_н$ для короткозамкнутых двигателей мощностью от 100 до 1 000 *квт* должны соответствовать табл. 13-17 и 13-18.

Минимальный момент вращения в процессе пуска для двигателей с

Таблица 13-17

Мощность, *квт*	Отношение начального пускового момента вращения к номинальному					
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	3000	1500	1000	750	600	500
До 400	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Более 400 до 1000	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	—
1250	—	1,0	—	—	—	—

Таблица 13-18

Мощность, *квт*	Отношение начального пускового тока к номинальному					
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*					
	3000	1500	1000	750	600	500
До 200	7,0	7,0	6,5	6,0	6,0	5,5
Более 200 до 400	7,0	7,0	6,0	6,0	6,0	5,5
400 до 1000	6,5	6,5	6,0	5,5	5,5	—
1250	—	5,5	—	—	—	—

короткозамкнутым ротором, кроме двухполюсных двигателей мощностью свыше 300 *квт*, должен быть не ниже 0,6 начального момента, но не ниже 0,8 номинального момента, для двухполюсных двигателей мощностью свыше 300 *квт* — не ниже 0,8 начального момента, но не ниже 0,6 номинального момента.

Для двигателей мощностью свыше 1 000 *квт* при скорости вращения 3 000 *об/мин* начальный и минимальный моменты не должны быть ниже 0,7, а при других скоростях вращения — ниже 1,0 номинального момента. Значения $I_{нач}/I_н$ для этих двигателей ГОСТ не устанавливаются. Обычно они не превышают 6,5—7 для быстроходных двигателей и 5,5—6 для двигателей на скорости вращения ниже 1 000 *об/мин.*

Для малых двигателей мощностью от 50 до 600 *вт* согласно ГОСТ 8212-56 значения $M_{нач}/M_н$ и $I_{нач}/I_н$ должны соответствовать табл. 13-19.

Таблица 13-19

Мощность, *вт*	Двигатели закрытого исполнения				Двигатели закрытого обдуваемого исполнения			
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*							
	3000		1500		3000		1500	
	$\frac{M_{нач}}{M_н}$	$\frac{I_{нач}}{I_н}$	$\frac{M_{нач}}{M_н}$	$\frac{I_{нач}}{I_н}$	$\frac{M_{нач}}{M_н}$	$\frac{I_{нач}}{I_н}$	$\frac{M_{нач}}{M_н}$	$\frac{I_{нач}}{I_н}$
50	1,5	5,0	1,5	3,0	1,3	4	1,3	3
80	1,5	5,0	1,6	4,0	1,3	4	1,3	3
120	1,7	5,5	1,6	4,5	1,3	4	1,8	4
180	1,7	5,5	1,6	4,5	2,0	5	1,8	4
270	2,0	6,0	1,6	5,0	2,0	5	1,8	4
400	2,0	6,5	—	—	2,0	5	1,8	4
600	—	—	—	—	2,0	5	—	—

Отношение минимального вращающего момента в процессе пуска к номинальному должно быть не менее 0,8.

Точный расчет пусковых характеристик вызывает большие затруднения, так как при этом приходится иметь дело со сложными зависимостями между токами, скольжением и параметрами двигателя.

Рассмотрим приближенный метод их расчета, который при принятых допущениях не должен внести заметных ошибок в конечные результаты.

Пренебрегая потерями в стали, можно написать следующие уравнения напряжений для цепей статора и ротора:

$$\dot{U}_1 = j\dot{I}_1 x_{11н} + j\dot{I}'_2 x_{12к} + \dot{I}_1 r_1; \quad (13\text{-}168)$$

$$0 = j\dot{I}'_2 x_{22\xi н} s + j\dot{I}_1 x_{12к} s + \dot{I}'_2 r'_{2\xi}; \quad (13\text{-}169)$$

здесь

$$x_{11н} = x_{12к} + x_{1н} \quad (13\text{-}170)$$

— полное индуктивное сопротивление статорной обмотки с учетом насыщения;

$$x_{22\xi н} = x_{12к} + x'_{2\xi н} \quad (13\text{-}171)$$

— полное индуктивное сопротивление роторной обмотки с учетом насыщения и вытеснения тока;

$x_{12к}$ — индуктивное сопротивление взаимной индукции при коротком замыкании, которое можно определить по соотношению

$$x_{12к} = x_{12}\frac{F_{цепи}}{F_\delta} \approx x_{12}(1{,}3 \div 1{,}7), \quad (13\text{-}172)$$

так как в этом случае машина работает на прямолинейной части магнитной характеристики, т. е. без насыщения стальных участков магнитной цепи. В пределах изменения скольжения от 1 до 0,1 можно считать $x_{12к} \approx \text{const}$.

Учитывая (13-170), (13-171) и равенства

$$1 + \frac{x_{1н}}{x_{12к}} = c_{1н}; \quad (13\text{-}173)$$

$$1 + \frac{x'_{2\xi н}}{x_{12к}} = c_{2\xi н}, \quad (13\text{-}174)$$

из (13-168) и (13-169) получим выражения для токов (комплексы и их модули) в следующем виде:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{A + jB}{C + jD} \text{ и}$$

$$I_1 = U_1 \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{\sqrt{C^2 + D^2}}; \quad (13\text{-}175)$$

$$\dot{I}'_2 = -\dot{U}_1 \frac{jF}{C + jD} \text{ и } I'_2 = = U_1 \frac{F}{\sqrt{C^2 + D^2}}, \quad (13\text{-}176)$$

где

$$\left.\begin{aligned} &A = \frac{r'_{2\xi}}{x_{12к}}; \; B = sc_{2\xi н}; \\ &C = \frac{r_1 r'_{2\xi}}{x_{12к}} - s(x'_{2\xi н} c_{1н} + x_{1н}); \\ &D = sr_1 c_{2\xi н} + r'_{2\xi} c_{1н}; \; F = s. \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}177)$$

Не делая заметной ошибки, можно при определении тока I_1 по (13-175) и тока I'_2 по (13-176) вместо (13-177) использовать более простые выражения:

$$\left.\begin{aligned} &A' = \frac{r'_{2\xi}}{x_{12к} c_{2\xi н}} \approx 0; \; B' = s; \\ &C' \approx -s\left(x'_{2\xi н} + \frac{x_{1н}}{c_{2\xi н}}\right); \\ &D' \approx sr_1 + r'_{2\xi}; \; F' = \frac{s}{c_{2\xi н}}. \end{aligned}\right\} \quad (13\text{-}178)$$

Они получены после деления равенств (13-177) на $c_{2\xi н}$ и при допущении $c_{1н} \approx c_{2\xi н}$ (обычно последние величины лежат в пределах 1,01—1,03). Кроме того, приняты следующие допущения: $A' \approx 0$, так как при изменении s в пределах 1—0,1 величина A'^2 мала по сравнению с B'^2 и, следовательно, мало влияет на значение тока I_1 [см. (13-175)]; первый член выражения для C [см. (13-177)] по сравнению с его вторым членом составляет незначительную величину и принят равным нулю.

При указанных упрощениях получим следующие формулы для расчета токов:

$$I_1 \approx \frac{U_1 s}{\sqrt{C'^2 + D'^2}} \text{ и}$$

$$I'_2 \approx \frac{1}{c_{2\xi н}} I_1. \quad (13\text{-}179)$$

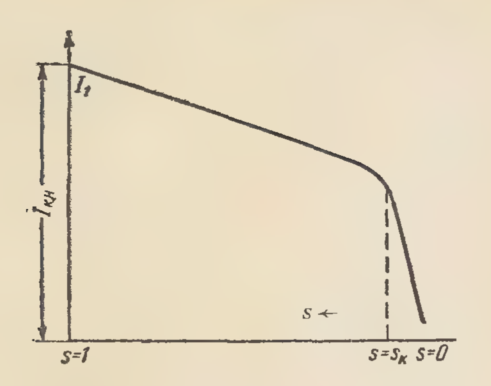


Рис. 13-50. Кривая $I_1=f(s)$ в первом приближении для определения параметров двигателя с учетом насыщения.

Значение кратности пускового момента рассчитывается по формуле

$$\frac{M}{M_н}=\left(\frac{I'_2}{I'_{2н}}\right)^2\frac{r'_{2\xi}}{r'_2}\frac{s_н}{s},\quad (13\text{-}180)$$

где номинальные значения $I'_{2н}$ и $s_н$ определяются по круговой диаграмме или расчетным путем, как указано в § 13-9, а.

При определении пусковых характеристик нужно задаться значениями скольжения s и для каждого из них рассчитать параметры, токи и вращающий момент. Однако на параметры машины влияет не только вытеснение тока, которое зависит от s, но и насыщение зубцов, которое зависит от I_1и I'_2. Поэтому точное определение кривых $I_1=f(s)$ и $M=f(s)$ представляет собой сложную задачу. Ее можно решить путем последовательных приближений.

Вначале построим в первом приближении кривую $I_1=f(s)$ только для учета влияния насыщения на параметры машины, используя для этого значение тока $I_{к.н}$ (см. § 13-7,г) и значение тока I_1 при изменении s от 0 до $s_к$, причем ток I_1 при $s_к$, найденный по круговой диаграмме или расчетным путем, следует умножить на $k_{м.н}=1{,}1\div1{,}2$ (см. § 13-9, а, п. 2). Далее проведем от значения тока, соответствующего приблизительно $s_к$, до значения $I_{к.н}$ прямую линию. Построенная таким способом примерная кривая представлена на рис. 13-50.

Теперь можно найти параметры машины для каждого значения s с учетом вытеснения тока и насыщения и после этого рассчитать кривую $I_1=f(s)$. Эта полученная во втором приближении кривая, как показывают расчеты, мало отличается от кривых, полученных в последующих приближениях. Поэтому при практических расчетах можно ограничиться только вторым приближением.

Если расчет пусковых характеристик по предлагаемому методу производить в определенном порядке, то он не должен вызвать затруднений (см. пример расчета в § 13-10,А).

При расчете пусковых характеристик короткозамкнутого двигателя с двойной клеткой иногда бывает необходимо определить зависимости токов пусковой и рабочей клеток от скольжения. Эти зависимости найдем из следующих соотношений (рис. 13-23):

$$\left.\begin{aligned}\dot I'_в&=\dot I'_{20}\frac{r'_н+jsx'_н}{r'_в+r'_н+jsx'_н};\\ \dot I'_н&=\dot I'_{20}\frac{r'_в}{r'_в+r'_н+jsx'_н},\end{aligned}\right\}\quad(13\text{-}181)$$

где I'_{20} рассчитывается так же, как и I'_2 короткозамкнутого двигателя с одинарной клеткой.

Более просто токи $I'_в$ и $I'_н$ определяются при помощи диаграммы (рис. 13-51):

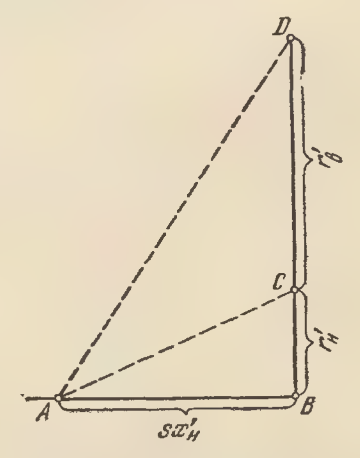


Рис. 13-51. К определению токов пусковой и рабочей клеток.

$$I'_{в} = I'_{20} \frac{\overline{AC}}{\overline{AD}}; \qquad I'_{н} = I'_{20} \frac{\overline{CD}}{\overline{AD}}.$$

При изменении s будет изменяться только отрезок $\overline{AB}$ (будет смещаться точка A); следовательно, зная I'_{20} и s, мы легко найдем $I'_{в}$ и $I'_{н}$. Ошибка, получающаяся из-за пренебрежения $x'_{в}$, как уже отмечалось, не превышает нескольких процентов.

13-10. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

А. Расчет короткозамкнутого двигателя 13 *квт*

Проектное задание. Трехфазный короткозамкнутый двигатель 13 *квт*, 220/380 *в*, 50 *гц*, 1 500 *об/мин*.

Режим работы продолжительный. Конструкция защищенная. Вентиляция радиальная (нормальная серийная машина).

По табл. 13-2а $\cos\varphi_{н}=0{,}88$; $\eta_{н}=0{,}885$.

а) Главные размеры

1. *Число пар полюсов*

$$p = \frac{f_1 \cdot 60}{n_1} = \frac{50 \cdot 60}{1\,500} = 2.$$

2. *Расчетная мощность*

$$P' = \frac{k_E P_{н}}{\eta_{н} \cos\varphi_{н}} = \frac{0{,}97 \cdot 13}{0{,}885 \cdot 0{,}88} = 16{,}2 \text{ ква}$$

($k_E=0{,}97$ по рис. 6-19).

3. *Диаметры статора.* По рис. 13-7 $D \approx 19$ *см*; по (13-9) $D_a \approx 1{,}58\, D \approx 30$ *см*; согласно табл. I-2 ближайший внешний диаметр $D_a=29{,}1$ *см*; отсюда $D \approx \frac{29{,}1}{1{,}58} = 18{,}42$ *см*; выбираем $D=18{,}4$ *см*.

4. *Полюсное деление*

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 18{,}4}{4} = 14{,}45 \text{ см}.$$

5. *Расчетная длина статора*

$$l_\delta = \frac{6{,}1 \cdot 10^{11} P'}{\alpha_\delta\, k_B\, k_{01}\, AB_\delta\, D^2 n_1} =$$

$$= \frac{6{,}1 \cdot 10^{11} \cdot 16{,}2}{0{,}715 \cdot 1{,}09 \cdot 0{,}91 \cdot 310 \cdot 7\,200 \cdot 18{,}4^2 \cdot 1\,500} = 12{,}26 \text{ см}$$

(по рис. 13-1 для $\tau=14{,}45$ *см* $A=310$ *а/см*; $B_\delta=7\,200$ *гс*; $\alpha_\delta=0{,}715$; $k_B=1{,}09$; выбираем двухслойную петлевую обмотку при $k_{01} \approx 0{,}91$); возьмем $l_\delta=12{,}3$ *см*.

6. *Действительная длина статора*

$$l_1 = l = l_\delta = 12{,}3 \text{ см}.$$

7. *Таблица вариантов.* Составляем таблицу вариантов (табл. 13-20), имея в виду выполнение при одних и тех же диаметрах D_a и D для $2p=4$ двух двигателей 13 и 17 *квт* (см. табл. 13-2а). Выбираем первый вариант, так как только при этом варианте получаются приемлемые значения l_δ/τ для обоих двигателей.

Таблица 13-20

Варианты расчета

№ варианта	D_a	D	τ	A	B_δ	l_δ	l_1	l_δ/τ (13 *квт*)	$\gamma l_\delta/\tau$ (17 *квт*)
1	29,1	18,4	14,45	310	7200	12,3	12,3	0,852	1,11
2	24,8	15,7	12,3	280	7100	19,0	19,0	1,545	2,02
3	34,3	21,6	16,95	330	7300	8,3	8,3	0,49	0,64

б) Обмотка, пазы и ярмо статора. Воздушный зазор

8. *Число пазов на полюс и фазу.* Выбираем $q_1=3$.

9. *Общее число пазов статора*

$$Z_1 = 6pq_1 = 6 \cdot 2 \cdot 3 = 36.$$

10. *Зубцовое деление статора*

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 18{,}4}{36} = 1{,}605 \text{ см}.$$

11. *Номинальный фазный ток*

$$I_{1н} = \frac{P_{н} \cdot 10^3}{m_1 U_1 \eta_{н} \cos\varphi_{н}} = \frac{13 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}885 \cdot 0{,}88} = 25{,}3 \text{ а}$$

(при 220/380 *в* — соединение фаз Δ/Y).

12. *Число эффективных проводников на паз при* $a_1=1$ по (13-22)

$$u_{п1} = \frac{At_1 a_1}{I_{1н}} = \frac{310 \cdot 1{,}605 \cdot 1}{25{,}3} = 19{,}7;$$

возьмем $u_{п1}=20$.

13. *Сечение и диаметр проводника.* Выбираем плотность тока $\Delta_c \approx 5{,}2$ *а/мм*. Сечение проводника по (13-25)

$$s'_c = \frac{I_{1н}}{a_1 n_{эл} \Delta_c} = \frac{25{,}3}{1 \cdot 3 \cdot 5{,}2} = 1{,}62 \text{ мм}^2.$$

Для обмотки с изоляцией класса Е по табл. IV-1 и IV-3 выбираем провод марки ПЭТВ: $d/d_{из}=1{,}45/1{,}56$ *мм*; $s_c=1{,}651$ *мм*^{2}.

14. *Плотность тока*

$$\Delta_c = \frac{I_{1н}}{n_{эл}\, a_1\, s_c} = \frac{25,3}{3 \cdot 1 \cdot 1,651} = 5,1\ a/мм^2.$$

15. *Размеры паза, зубца и пазовая изоляция.* Общее число проводников в пазу $n_п = u_{п1} n_{эл} = 20 \cdot 3 = 60$. «Площадь», занимаемая проводниками, $n_п d^2_{из} = 60 \cdot 1,56^2 = 146\ мм^2$; следовательно, при $k_з = 0,73$ [см. (4-5)] свободная площадь паза

$$S'_п = \frac{n_п\, d^2_{из}}{k_з} = \frac{146}{0,73} \approx 200\ мм^2.$$

Выбираем трапецеидальный паз и зубец с параллельными стенками. Размеры паза подбираем таким образом, чтобы $S'_п \approx 200\ мм^2$ и $B_{z1} \approx 16\,500\ гс$.

На рис. 13-52 указаны размеры паза и зубца (*мм*), в табл. 13-21 (см. также табл. VII-2) приведена спецификация паза.

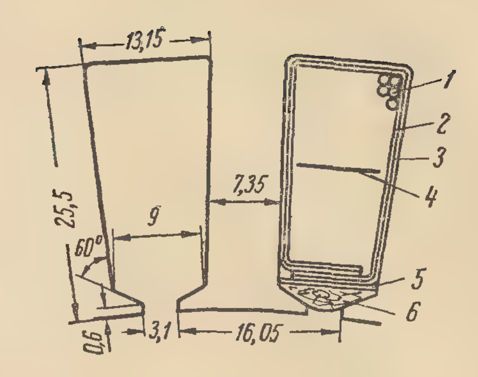


Рис. 13-52.

Толщина изоляции по ширине 1,1 *мм*; припуск на штамповку 0,4 *мм*. Толщина изоляции по высоте 2,4 *мм* (высота клина — «по месту»).

Таблица 13-21

Спецификация паза

Позиция на рис. 13-52	Материал	Количество слоев: толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Толщина изоляции, *мм*: по ширине	Толщина изоляции, *мм*: по высоте
1	Провода марки ПЭТВ: 1,45/1,56; 1,651 *мм²*	—	—	—	—	—
2	Пленкоэлектрокартон	0,27	2	3	0,54	0,8
3	Электрокартон ЭВ	0,27	2	3	0,54	0,8
4	Пленкоэлектрокартон	0,27	—	2	—	0,54
5	То же	0,27	—	1	—	0,27
6	Клин (бук, промасленный)	~3,0	—	1	—	3,0
	Всего на паз	—	—	—	1,1	5,4

Определяем после выбора размеров паза с учетом изоляции (и междукатушечной прокладки)

$$S'_п \approx 197\ мм^2.$$

16. *Коэффициент заполнения свободной площади паза по* (4-5)

$$k_з = \frac{n_п\, d^2_{из}}{S'_п} = \frac{146}{197} \approx 0,74.$$

17. *Скос пазов* берем на статоре; принимаем $b_c = 12,5\ мм$;

$$\frac{1}{n} = \frac{b_c}{\pi D} = \frac{12,5}{\pi \cdot 184} \approx \frac{1}{46}$$

части внутренней окружности статора.

18. *Число витков фазы по* (13-24)

$$w_1 = p q_1 \frac{u_{п1}}{a_1} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{20}{1} = 120.$$

19. *Шаг обмотки*

$y = 0,83\ \ \tau = 0,83 \cdot 3\ \ q_1 = 0,83 \cdot 9$; выбираем $y = 7\,(1 \rightarrow 8)$;

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} = 0,778.$$

20. *Обмоточные коэффициенты* по приложению VIII

$$k_{y1} = 0,94;\quad k_{o1} = 0,902.$$

21. *Магнитный поток в воздушном зазоре*

$$\Phi = \frac{k_E U_{1н} \cdot 10^8}{4 k_B f_1 w_1 k_{o1}} = \frac{0,97 \cdot 220 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,09 \cdot 50 \cdot 120 \cdot 0,902} = 0,903 \cdot 10^6\ мкс.$$

22. *Индукция в воздушном зазоре*

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{0,903 \cdot 10^6}{0,715 \cdot 14,45 \cdot 12,3} = 7\,120\ гс.$$

23. *Максимальная (и средняя) индукция в зубце*

$$B_{z1м}=B_{z1ср}=\frac{B_\delta\,t_1 l_\delta}{b_{z1} l k_c}=$$

$$=\frac{7\,120\cdot 1,605\cdot 12,3}{0,73\cdot 12,3\cdot 0,95}=16\,450\ гс$$

(выбираем электротехническую сталь марки Э12 толщиной 0,5 *мм*; листы не лакируются, что допустимо при $l_1<14$ *см*; при этом $k_c=0{,}95$).

24. *Высота ярма статора*

$$h_c=\frac{D_a-D}{2}-h_{z1}=\frac{29,1-18,4}{2}-$$

$$-2,55=2,8\ см.$$

25. *Индукция в ярме статора*

$$B_c=\frac{\Phi}{2h_c l k_c}=\frac{0,903\cdot 10^6}{2\cdot 2,8\cdot 12,3\cdot 0,95}=$$

$$=13\,800\ гс.$$

26. *Воздушный зазор* по рис. 13-15

$$\delta=0,45\ мм.$$

в) Обмотка, пазы и ярмо ротора

27. *Число пазов выбираем* по табл. 13-7:

$$Z_2=46.$$

28. *Внешний диаметр ротора*

$$D'=D-2\delta=18,4-2\cdot 0,045=$$

$$=18,31\ см.$$

29. *Зубцовое деление ротора*

$$t_2=\frac{\pi D'}{Z_2}=\frac{\pi\cdot 18,31}{46}=1,25\ см.$$

30. *Ток в стержне* по (13-36) при $k_I=0{,}92$ по рис. 13-11

$$I_c=I_2=k_I\,I_{1н}\frac{6w_1k_{o1}}{Z_2}=$$

$$=0,92\cdot 25,3\cdot\frac{6\cdot 120\cdot 0,902}{46}=328\ a.$$

31. *Ток в короткозамыкающем кольце* по (13-38)

$$I_к=I_c\frac{1}{2\sin\frac{\pi p}{Z_2}}=I_c\frac{1}{\Delta}=$$

$$=328\cdot\frac{1}{0,272}=1205\ a$$

$$\left(\Delta=2\sin\frac{\pi p}{Z_2}=2\sin\frac{2\pi}{46}=0,272\right).$$

32. *Сечение стержня* при плотности тока $\Delta_c\approx 3{,}4$ *а/мм²* по (13-37)

$$s_c=\frac{I_c}{\Delta_c}=\frac{328}{3,4}\approx 97\ мм^2.$$

33. *Сечение короткозамыкающего кольца* при плотности тока $\Delta_к\approx 2{,}6$ *а/мм²* по (13-39)

$$s_к=\frac{1\,205}{2,6}\approx 465\ мм^2.$$

34. *Размеры паза и зубца ротора.* Выбираем форму паза по рис. 13-12, *в* при $h_1=28$ *мм*, $b_{ш2}=1{,}5$ *мм*. Так как $S_п=s_c\approx 97$ *мм²*, то по (13-35) $b_{п2}\approx\frac{S_п}{h_1}=\frac{97}{28}\approx 3{,}47$ *мм*; выбираем $b_{п2}=3{,}5$ *мм*. При выбранных размерах паза (рис. 13-53) его площадь определяется по (13-35).

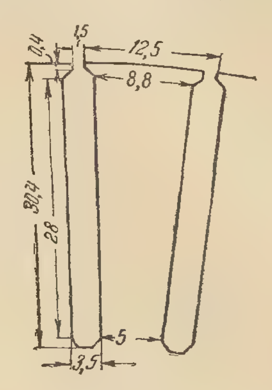


Рис. 13-53.

35. *Площадь паза*

$$S_п=s_c=h_1 b_{п2}+0,5\left(b_{п2}^2-b_{ш2}^2\right)=$$

$$=28\cdot 3,5+0,5\,(3,5^2-1,5^2)=103\ мм^2.$$

36. *Размеры короткозамыкающего кольца*

$$s_к=ab=33\cdot 14=462\ мм^2$$

(сечение кольца имеет форму трапеции).

37. *Высота ярма ротора* по (6-55) при отсутствии аксиальных каналов и непосредственной посадке пакета ротора на вал ($D_a'=d_в=6$ *см*)

$$h_p=\frac{D'-D_a'+\frac{1}{6}D_a'}{2}-h_{z2}=$$

$$=\frac{18,31-6+\frac{1}{6}6}{2}-3,04=3,615\ см.$$

38. *Индукция в ярме ротора*

$$B_p=\frac{\Phi}{2h_p l_2 k_c}=\frac{0,903\cdot 10^6}{2\cdot 3,615\cdot 12,8\cdot 0,95}=$$

$$=10\,300\ гс$$

(длина ротора $l_2=l_1+0{,}5=12{,}3+0{,}5=12{,}8$ *см*).

г) Намагничивающий ток

39. *Коэффициент воздушного зазора* по рис. 6-11

$$k_{\delta 1}=1,14\ \left(для\ \frac{b_{ш1}}{t_1}=\frac{3,1}{16,05}=\right.$$

$$\left.=0,193\ и\ \frac{b_{ш1}}{\delta}=\frac{3,1}{0,45}=6,9\right);$$

$$k_{\delta 2} = 1{,}07 \left(\text{для } \frac{b_{ш2}}{t_2} = \frac{1{,}5}{12{,}5} = \right.$$

$$\left. = 0{,}12 \text{ и } \frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{1{,}5}{0{,}45} = 3{,}33\right);$$

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1{,}14 \cdot 1{,}07 = 1{,}22.$$

40. *Магнитное напряжение воздушного зазора*

$$F_\delta = 1{,}6 B_\delta k_\delta \delta = 1{,}6 \cdot 7\,120 \cdot 1{,}22 \cdot 0{,}045 =$$

$$= 624 \ a.$$

41. *Магнитное напряжение зубцов статора*

$$F_{z1} = 2 l_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 2{,}55 \cdot 57 = 291 \ a$$

[по табл. II-1 для $B_{z1ср} = 16\,450$ *гс* (см. п. 23) $H_{z1} = 57$ *а/см*; $l_{z1} = h_{z1} = 2{,}55$ *см*].

42. *Магнитное напряжение зубцов ротора*

$$F_{z2} = 2 l_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 3{,}04 \cdot 31{,}2 = 190 \ a$$

[индукции в зубцах:

$$B_{z2мин} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2макс} l_2 k_c} =$$

$$= \frac{7\,120 \cdot 1{,}25 \cdot 12{,}3}{0{,}88 \cdot 12{,}8 \cdot 0{,}95} = 10\,250 \ гс;$$

$$B_{z2макс} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2мин} l_2 k_c} =$$

$$= \frac{7\,120 \cdot 1{,}25 \cdot 12{,}3}{0{,}5 \cdot 12{,}8 \cdot 0{,}95} = 18\,100 \ гс;$$

$B_{z2ср} = 13\,150$ *гс*; по табл. II-1 находим:

$$H_{z2мин} = 5{,}35 \ а/см; \quad H_{z2макс} = 134 \ а/см;$$

$$H_{z2ср} = 12{,}5 \ а/см; \quad H_{z2} = \frac{1}{6}(5{,}35 + 134 +$$

$$+ 4 \cdot 12{,}5) = 31{,}2 \ а/см].$$

43. *Коэффициент насыщения зубцов* по (6-83)

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} =$$

$$= \frac{624 + 291 + 190}{624} = 1{,}775.$$

43а. *Уточнение значений индукций и магнитных напряжений зазора и зубцов статора и ротора.* Так как полученное значение k_z отличается от 1,325 (чему соответствует $\alpha_\delta = 0{,}715$), то повторяем расчет F_δ, F_{z1}, F_{z2}, взяв по пунктирной кривой рис. 6-20 $\alpha_\delta = 0{,}746$ для $k_z = 1{,}775$. Индукции при этом изменяются в отношении $\frac{0{,}715}{0{,}746}$; следовательно, получим:

$$B_\delta = 6\,820 \ гс; \quad F_\delta = 600 \ a;$$

$$B_{z1ср} = 15\,750 \ гс; \quad H_{z1} = 38 \ а/см;$$

$$F_{z1} = 194 \ a;$$

$$B_{z2мин} = 9\,800 \ гс; \quad H_{z2мин} = 4{,}8 \ а/см;$$

$$B_{z2макс} = 17\,300 \ гс; \quad H_{z2макс} = 90{,}7 \ а/см;$$

$$B_{z2ср} = 12\,600 \ гс; \quad H_{z2ср} = 10{,}1 \ а/см;$$

$$H_{z2} = 22{,}65 \ а/см; \quad F_{z2} = 138 \ a; \quad k_z = 1{,}55.$$

44. *Магнитное напряжение ярма статора*

$$F_c = \zeta H_c l_c = 0{,}33 \cdot 14{,}8 \cdot 20{,}6 = 101 \ a$$

[по табл. II-1 для $B_c = 13\,800$ *гс* (см. п. 25) $H_c = 14{,}8$ *а/см*; по рис. 6-17 $\zeta = 0{,}33$; $l_c =$

$$= \frac{\pi (D_a - h_c)}{2p} = \frac{\pi (29{,}1 - 2{,}8)}{4} = 20{,}6 \ см\Big].$$

45. *Магнитное напряжение ярма ротора*

$$F_p = \zeta H_p l_p = 0{,}55 \cdot 5{,}41 \cdot 7{,}55 = 22{,}4 \ a$$

[по табл. II-1 для $B_p = 10\,300$ *гс* (см. п. 38) $H_p = 5{,}41$ *а/см*; по рис. 6-17 $\xi = 0{,}55$; по (6-54) $l_p =$

$$= \frac{\pi \left(D_a' + h_p\right)}{2p} = \frac{\pi (6 + 3{,}615)}{4} = 7{,}55 \ см\Big].$$

46. *Намагничивающая сила магнитной цепи* по (6-84)

$$F_{цепи} = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_c + F_p =$$

$$= 600 + 194 + 138 + 101 + 22{,}4 = 1055{,}4 \ a.$$

47. *Общий коэффициент насыщения*

$$k_\mu = \frac{F_{цепи}}{F_\delta} = \frac{1055{,}4}{600} = 1{,}76.$$

48. *Намагничивающий ток* по (6-85)

$$I_\mu = \frac{p F_{цепи}}{0{,}9 m_1 w_1 k_{01}} = \frac{2 \cdot 1055{,}4}{2{,}7 \cdot 120 \cdot 0{,}902} =$$

$$= 7{,}2 \ a;$$

в процентах номинального тока

$$I_\mu \% = \frac{I_\mu}{I_{1н}} \cdot 100 = \frac{7{,}2}{25{,}3} \cdot 100 = 28{,}4\%.$$

д) Параметры двигателя (для рабочего режима)

49. *Длина лобовой части обмотки статора* по (4-12)

$$l_{л1} = K_{л1} \tau_{у1} + 2B = 1{,}55 \cdot 12{,}8 +$$

$$+ 2 \cdot 1 = 21{,}85 \ см$$

$$\Big[\tau_{у1} = y_1 \frac{\pi (D + h_{п1})}{Z_1} = 7 \cdot \frac{\pi (18{,}4 + 2{,}55)}{36} =$$

$$= 12{,}8 \ см; \text{ из табл. 4-12 } K_{л1} = 1{,}55;$$

$$B = 1 \ см\Big].$$

50. *Длина вылета лобовой части обмотки статора* по (4-16)

$$l_{в1} = K_{в1} \tau_{у1} + B = 0{,}5 \cdot 12{,}8 + 1 = 7{,}4 \ см$$

($K_{в1}$ и B — из табл. 4-12).

51. *Средняя длина полувитка обмотки статора* по (4-11)

$$l_{ср1} = l_1 + l_{л1} = 12,3 + 21,85 = 34,15 \text{ см}.$$

52. *Общая длина проводников фазы обмотки статора* (при $a_1 = 1$)

$$L_1 = 2w_1 l_{ср1} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 120 \cdot 34,15 \cdot 10^{-2} = 82 \text{ м}$$

53. *Активное сопротивление обмотки статора*

$$r_1 = \rho_{75} \frac{L_1}{n_{эл} s_1 a_1} = \frac{1}{46} \cdot \frac{82}{3 \cdot 1,651 \cdot 1} = 0,36 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$r_1^* = \frac{I_{1н} r_1}{U_{1н}} = \frac{25,3 \cdot 0,36}{220} = 0,0414.$$

54. *Активное сопротивление обмотки ротора* по (7-14)

$$r_2 = r_c + \frac{2r_к}{\Delta^2} = 5,4 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,0965 \cdot 10^{-5}}{0,272^2} = 8,01 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$$

[сопротивление стержня по (7-12)

$$r_c = \rho_{a75} \frac{l_2' \cdot 10^{-2}}{s_c} = \frac{1}{23} \cdot \frac{12,8 \cdot 10^{-2}}{103} = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$$

(для литого алюминия согласно табл. 7-2 $\rho_{a75} = 1/23$); сопротивление части короткозамыкающего кольца между соседними стержнями по (7-13)

$$r_к = \rho_{a\,75} \frac{\pi D_к \cdot 10^{-2}}{Z_2 s_к} = \frac{1}{23} \times \frac{\pi \cdot 15,01 \cdot 10^{-2}}{46 \cdot 462} = 0,0965 \cdot 10^{-5} \text{ ом}$$

$(D_к = D' - a = 18,31 - 3,3 = 15,01$ *см*); $\Delta = 0,272$ (п. 31)]

55. *Коэффициент приведения параметров беличьей клетки к обмотке статора* по (7-16)

$$v = \frac{4m_1 (w_1 k_{o1})^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3\,(120 \cdot 0,902)^2}{46} = 3,06 \cdot 10^3.$$

56. *Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,*

$$r_2' = r_2 v = 8,01 \cdot 10^{-5} \cdot 3,06 \cdot 10^3 = 0,245 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$r_2'^* = \frac{I_{1н} r_2'}{U_{1н}} = \frac{25,3 \cdot 0,245}{220} = 0,0282.$$

57. *Коэффициенты магнитной проводимости рассеяния статора:*

пазового по (7-26)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_3}{b + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k_\beta' = \frac{20}{3 \cdot 9} 0,83 + \left(\frac{3}{9} + \frac{3 \cdot 1,08}{9 + 2 \cdot 3,1} + \frac{0,6}{3,1}\right) 0,873 = 1,26$$

[по рис. 7-8 при $\beta = 0,778$ $k_\beta = 0,83$ и $k_\beta' = 0,873$; размеры в миллиметрах (см. рис. 13-52) в соответствии с рис. 7-7, *г*: $h_1 = 20$; $b = 9$; $h_2 = 3$; $h_3 = 1,08$; $b_{ш1} = 3,1$; $h_{ш1} = 0,6$];

дифференциального по (7-40)

$$\lambda_{д1} = 0,9 \frac{t_1 (q_1 k_{o1})^2 \rho_{д1} k_{ш1}}{\delta k_\delta} \sigma_{д1} = 0,9 \cdot \frac{16,05\,(3 \cdot 0,902)^2\, 0,8 \cdot 0,95}{0,45 \cdot 1,22} \cdot 0,0111 = 1,62$$

[по табл. 7-3 $\rho_{д1} \approx 0,8$; по (7-42) $k_{ш1} \approx 1 - 0,033 \frac{b_{ш1}^2}{t_1 \delta} = 1 - 0,033 \cdot \frac{3,1^2}{16,05 \cdot 0,45} \approx 0,95$; по табл. 7-2а $\sigma_{д1} = 0,0111$];

лобовых частей по (7-45)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l_\delta'} (l_{л1} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{12,3} (12,85 - 0,64 \times 0,778 \cdot 14,45) = 1,21;$$

$$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} = 1,26 + 1,62 + 1,21 = 4,09.$$

58. *Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора* по (7-50)

$$x_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta'}{pq_1} \sum \lambda_1 = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{120}{100}\right)^2 \frac{12,3}{2 \cdot 3} \cdot 4,09 = 0,955 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x_1^* = \frac{I_{1н} x_1}{U_{1н}} = \frac{25,3 \cdot 0,955}{220} = 0,1095.$$

59. *Коэффициенты магнитной проводимости рассеяния ротора:*

пазового по (7-33)

$$\lambda_{п2} = \left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_3}{b + 2b_{ш2}}\right) + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} = \left(\frac{28}{3 \cdot 3,5} + \frac{3 \cdot 1}{3,5 + 2 \cdot 1,5}\right) + \frac{0,4}{1,5} = (3,12) + 0,266 = 3,386$$

[см. рис. 13-53 и (7-11)];

дифференциального по (7-41)

$$\lambda_{д2} = 0,9 \frac{t_2 (q_2 k_{o2})^2 \rho_{д2} k_{ш2}}{\delta k_\delta} \sigma_{д2} = 0,9 \cdot \frac{12,5 \left(\frac{46}{3 \cdot 4}\right)^2 \cdot 1 \cdot 1}{0,45 \cdot 1,22} \cdot 0,0062 = 1,86$$

(по табл. 7-2в $\sigma_{д2} = 0,0062$);

лобовых частей по (7-48)

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_к}{Z_2 l''_\delta \Delta^2} \lg \frac{4,7D_к}{a+2b} =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 15,01}{46 \cdot 12,8 \cdot 0,272^2} \lg \frac{4,7 \cdot 15,01}{3,3+2 \cdot 1,4} = 0,845$$

[$D_к$ (п. 54), Δ (п.31), a и b (п.36)];

$$\Sigma \lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2} = 3,386 + 1,86 + 0,845 = 6,091.$$

60. *Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора* по (7-52)

$$x_2 = 7,9 f_1 l''_\delta \Sigma \lambda_2 \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 50 \cdot 12,8 \times \times 6,091 \cdot 10^{-8} = 0,308 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

61. *Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора*, по (7-54)

$$x'_2 = x_2 v = 0,308 \cdot 10^{-3} \cdot 3,06 \cdot 10^3 = 0,94 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x'^*_2 = \frac{I_{1н} x'_2}{U_{1н}} = \frac{25,3 \cdot 0,94}{220} = 0,108.$$

62. *Индуктивное сопротивление взаимной индукции* (без учета скоса пазов) по (13-48)

$$x_{12} \approx \frac{U_{1н} - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{220 - 7,2 \cdot 0,955}{7,2} = 29,3 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x^*_{12} = \frac{I_{1н} x_{12}}{U_{1н}} = \frac{25,3 \cdot 29,3}{220} = 3,36.$$

63. *Индуктивные сопротивления рассеяния при учете скоса пазов.* Угол скоса $\gamma_c = \frac{360p}{n} = \frac{360 \cdot 2}{46} = 15,6°$ (см. п. 17); по (13-162) $\varepsilon = \frac{U_{1н}}{I_\mu x_1} = \frac{220}{7,2 \cdot 0,955} = 32$; из табл. 13-9 $\sigma_{ск} = 1,09$; следовательно, $x_1 \sigma_{ск} = 0,955 \cdot 1,09 = 1,04$ *ом*; $x'_2 \sigma_{ск} = 0,94 \cdot 1,09 = 1,02$ *ом*; в дальнейшем принимаем $x_1 = 1,04$ *ом*; $x'_2 = 1,02$ *ом*.

е) Потери в стали и механические потери

64. *Вес ярма статора*

$$G_c = \gamma h_c l k_c l_c (2p) 10^{-3} = 7,8 \cdot 2,8 \cdot 12,3 \cdot 0,95 \cdot 20,6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 21 \text{ кг}$$

[$\gamma = 7,8$ (см. табл. 2-1); $h_c = 2,8$ *см* (п. 24); $l_c = 20,6$ *см* (п. 44)].

65. *Вес зубцов статора*

$$G_{cz} = \gamma Z_1 h_{z1} b_{z1\,ср} l k_c \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 36 \cdot 2,55 \cdot 0,735 \cdot 12,3 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} = 6,15 \text{ кг}.$$

66. *Основные потери в стали ярма статора* по (8-24)

$$P_{с.с} = k_д p_{с.с} G_c \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot 5,7 \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 0,192 \text{ квт}$$

($p_{с.с} = 5,7$ *вт/кг* для стали Э12 при $B_c = 13\,800$ *гс* по приложению III).

67. *Основные потери в стали зубцов статора* по (8-26)

$$P_{cz} = k_д p_{cz} G_{cz} \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 7,95 \cdot 6,15 \cdot 10^{-3} = 0,088 \text{ квт}$$

($p_{cz} = 7,95$ *вт/кг* при $B_{z1ср} = 15\,750$ *гс* по приложению III).

68. *Поверхностные потери в зубцах ротора* по (8-31)

$$P_{пов.р} = 2p\tau \frac{t_2 - b_{ш2}}{t_2} l p_{пов.р} \cdot 10^{-7} = 4 \cdot 14,45 \cdot \frac{1,25 - 0,15}{1,25} \cdot 12,3 \cdot 485 \cdot 10^{-7} = 0,0306 \text{ квт}$$

[по (8-30) $p_{пов.р} = 0,5 K_0 \left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000}\right)^{1,5} \left(\frac{B_0 t_1}{1\,000}\right)^2 = 0,5 \cdot 2 \left(\frac{36 \cdot 1\,500}{10\,000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{3\,020 \cdot 1,605}{1\,000}\right)^2 = 485$ *вт/м²*, где из табл. 8-1 $K_0 = 2$ и по (8-27) $B_0 = \beta_0 k_\delta B_\delta = 0,365 \cdot 1,22 \cdot 6\,820 = 3\,020$ *гс* (по рис. 8-4 для $\frac{b_{ш1}}{\delta} = \frac{3,1}{0,45} = 6,9$ $\beta_0 = 0,365$)].

69. *Пульсационные потери в зубцах ротора* по (8-32)

$$P_{пул.р} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000} \frac{B_{пул.р}}{1\,000}\right)^2 G_{zp} \cdot 10^{-3} = 0,11 \left(\frac{36 \cdot 1\,500}{10\,000} \cdot \frac{900}{1\,000}\right)^2 9,15 \cdot 10^{-3} = 0,024 \text{ квт}$$

[по (8-33) $B_{пул.р} = \frac{\gamma_c \delta}{2t_2} B_{z2ср} = \frac{4 \cdot 0,45}{2 \cdot 12,5} \times 12\,600 = 900$ *гс*, где по (8-34)

$$\gamma_c = \frac{\left(\frac{b_{ш1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{ш1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3,1}{0,45}\right)^2}{5 + \frac{3,1}{0,45}} = 4;$$

$B_{z2ср} = 12\,600$ *гс* (п. 43, *а*);

$G_{zp} = \gamma Z_2 h_{z2} b_{z2ср} l_2 k_c \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 46 \times 3,04 \cdot 0,69 \cdot 12,8 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} = 9,15$ *кг*].

70. *Потери в стали — основные, добавочные и полные*

$$P_{c1} = P_{с.с} + P_{cz} = 0,192 + 0,088 = 0,280 \text{ квт};$$

$$P_{с.д} = P_{пов.р} + P_{пул.р} = 0,0306 + 0,024 \approx 0,055 \text{ квт};$$

$$P_c = P_{c1} + P_{с.д} = 0,280 + 0,055 \approx 0,34 \text{ квт}$$

(поверхностными и пульсационными потерями в зубцах статора пренебрегаем).

71. *Механические потери* по (8-19)

$$P_{\text{мех}} = k_т \left(\frac{n_1}{1\,000}\right)^2 \left(\frac{D}{10}\right)^3 10^{-3} =$$

$$= 7\left(\frac{1\,500}{1\,000}\right)^2 \left(\frac{18,4}{10}\right)^3 10^{-3} \approx 0,1 \text{ квт}.$$

ж) Круговая диаграмма

72. *Параметры для построения круговой диаграммы* (§ 13-9,а, 1)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{1,04}{29,3} =$$

$$= 1,0355; \quad c_1 x_1 = 1,0355 \cdot 1,04 =$$

$$= 1,073 \text{ ом}; \quad c_1^2 x_2' =$$

$$= 1,0355^2 \cdot 1,02 = 1,09 \text{ ом};$$

$$c_1 r_1 = 1,0355 \cdot 0,36 = 0,373 \text{ ом};$$

$$c_1^2 r_2' = 1,0355^2 \cdot 0,245 = 0,262 \text{ ом};$$

$$x_к' = c_1 x_1 + c_1^2 x_2' = 1,073 + 1,09 = 2,163 \text{ ом};$$

$$r_к' = c_1 r_1 + c_1^2 r_2' = 0,373 + 0,262 = 0,635 \text{ ом};$$

$$r_{12} \approx \frac{P_{c1} \cdot 10^3}{m_1 I_\mu^2} = \frac{0,280 \cdot 10^3}{3 \cdot 7,2^2} = 1,8 \text{ ом}$$

($\gamma_1 \approx -0,5°$; можно принять $\gamma_1 = 0$).

73. *Электрические потери в обмотке статора при холостом ходе*

$$P_{э0} = m_1 I_0^2 r_1 = 3 \cdot 7,2^2 \cdot 0,36 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,056 \text{ квт}$$

(принято $I_0 \approx I_\mu = 7,2$ *а*).

74. *Электрические потери и основные потери в стали статора при холостом ходе*

$$P_0' = P_{э0} + P_{c1} = 0,056 + 0,280 =$$

$$= 0,336 \text{ квт}.$$

75. *Ток холостого хода и* $\cos\varphi_0$

$$P_0 = P_0' + P_{\text{е.д}} + P_{\text{мех}} = 0,336 +$$

$$+ 0,055 + 0,1 \approx 0,50 \text{ квт};$$

$$I_{0a} = \frac{P_0 \cdot 10^3}{m_1 U_{1н}} = \frac{0,50 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} = 0,76 \text{ а};$$

$$I_0 \approx \sqrt{I_\mu^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{7,2^2 + 0,76^2} =$$

$$= 7,24 \text{ а};$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0} = \frac{0,76}{7,24} = 0,105.$$

76. *Диаметр окружности тока*

$$D_к = \frac{U_{1н}}{x_к'} = \frac{220}{2,163} = 101,5 \text{ а}.$$

Выбираем масштаб для тока $C_I = 0,5$ *а/мм*, при этом диаметр окружности в миллиметрах равен:

$$\frac{D_к}{C_I} = \frac{101,5}{0,5} = 203 \text{ мм}.$$

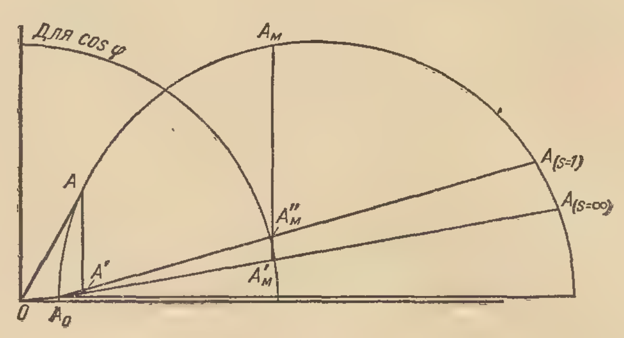


Рис. 13-54.

77. *Углы для построения диаметра, линий вращающих моментов и механических мощностей ротора* ($\gamma_1 = 0$)

$$\operatorname{tg}\alpha_{(s=\infty)} = \frac{c_1 r_1}{x_к'} = \frac{0,373}{2,163} = 0,172;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{(s=1)} = \frac{r_к'}{x_к'} = \frac{0,635}{2,163} = 0,293.$$

По приведенным данным согласно указаниям § 13-9, а, п. 1 построена круговая диаграмма. Она представлена в уменьшенном масштабе на рис. 13-54.

з) Рабочие характеристики. Номинальные величины. Кратность максимального момента

78. *Рабочие характеристики* представлены на рис. 13-55 (они рассчитаны по значениям I_1, I_2' и $\cos\varphi$, взятым из круговой диаграммы).

79. *Номинальные величины:* $I_{1н} = 25$ *а*; $\cos\varphi_н = 0,885$; $\eta_н = 0,89$; $I_{2н}' = 22,7$ *а*; $s_н = 2,72\%$ (значение η при $P_2 = 0,6\ P_{2н}$ повышается до 0,901).

80. *Кратность максимального момента*

$$M_м^* = \frac{M_м}{M_н} = 2,05$$

(из круговой диаграммы без учета насыщения от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях ротора).

и) Пусковые характеристики

81. *Параметры двигателя при учете вытеснения тока* (при $s=1$). По (13-53) $\xi = 0,067\ a\sqrt{s} = 0,067 \cdot 30 = 2,01$; по рис. 13-18 для $\xi = 2,01$ имеем: $\varphi = 0,92$ и $\psi = 0,75$; по

337

(13-56) $K_R = 1 + \frac{l_{\xi n}}{l'_2}\varphi = 1 + 0{,}92 = 1{,}92$; по

(13-55) $r_{c\xi} = r_c K_R = 5{,}4 \cdot 1{,}92 \cdot 10^{-5} = 10{,}4 \cdot 10^{-5}$ *ом.*

Активное сопротивление обмотки ротора по (13-60)

$$r_{2\xi} = r_{c\xi} + \frac{2r_к}{\Delta^2} = 10{,}4 \cdot 10^{-5} + $$

$$+ \frac{2 \cdot 0{,}0965 \cdot 10^{-5}}{0{,}272^2} = 13{,}01 \cdot 10^{-5} \text{ ом (п. 54).}$$

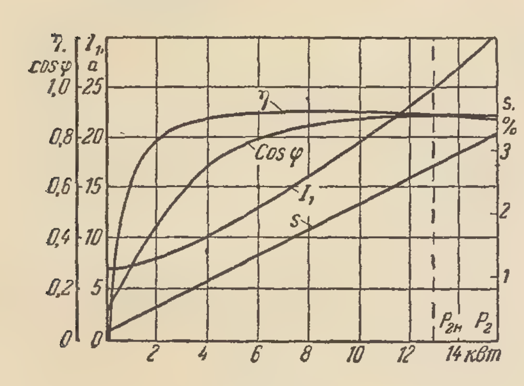


Рис. 13-55.

По (7-33) с учетом вытеснения тока

$$\lambda_{п2\xi} = \left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_3}{b + 2b_{ш2}}\right)\psi + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} =$$

$$= (3{,}12) \cdot 0{,}75 + 0{,}266 = 2{,}606 \text{ (п.59)};$$

по (13-61)

$$\Sigma\lambda_{2\xi} = \lambda_{п2\xi} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2} =$$

$$= 2{,}606 + 1{,}86 + 0{,}845 = 5{,}311 \text{ (п.59)}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора по (13-63)

$$x_{2\xi} = x_2 \frac{\Sigma\lambda_{2\xi}}{\Sigma\lambda_2} = 0{,}308 \cdot \frac{5{,}311}{6{,}091} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0{,}269 \cdot 10^{-3} \text{ ом};$$

с учетом скоса пазов

$$x_{2\xi} = 1{,}09 \cdot 0{,}269 \cdot 10^{-3} = 0{,}293 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

Сопротивления обмотки ротора, приведенные к обмотке статора:

$$r'_{2\xi} = r_{2\xi}v = 13{,}01 \cdot 10^{-5} \cdot 3{,}06 \cdot 10^3 =$$

$$= 0{,}4 \text{ ом}; \; x'_{2\xi} = x_{2\xi}v = 0{,}293 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times 3{,}06 \cdot 10^3 = 0{,}9 \text{ ом}.$$

Сопротивления короткого замыкания ($s=1$):

$$r_{к\xi} \approx r_1 + r'_{2\xi} = 0{,}36 + 0{,}40 = 0{,}76 \text{ ом};$$

$$x_{к\xi} = x_1 + x'_{2\xi} = 1{,}04 + 0{,}90 = 1{,}94 \text{ ом}$$

(x_1 и $x'_{2\xi}$ взяты с учетом скоса пазов);

$$z_{к\xi} \approx \sqrt{r_{к\xi}^2 + x_{к\xi}^2} = \sqrt{0{,}76^2 + 1{,}94^2} =$$

$$= 2{,}08 \text{ ом}.$$

82. *Параметры двигателя при учете вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния:*

Ток короткого замыкания без учета насыщения

$$I_к \approx \frac{U_{1н}}{z_{к\xi}} = \frac{220}{2{,}08} = 106 \text{ а}.$$

Ток короткого замыкания с учетом насыщения (предварительное значение) по (13-122)

$$I_{к.н} = k_н I_к \approx 1{,}3 \cdot 106 = 138 \text{ а}.$$

Средняя н. с., отнесенная к одному пазу статора, по (13-123)

$$F_{п.ср} = 0{,}7 \frac{I_{к.н} u_{п1}}{a_1}\left(k_\beta + k_{у1} k_{о1} \frac{Z_1}{Z_2}\right) =$$

$$= 0{,}7 \cdot \frac{138 \cdot 20}{1}\left(0{,}84 + 0{,}94 \cdot 0{,}902 \cdot \frac{36}{46}\right) =$$

$$= 2\,900 \text{ а}.$$

По (13-125)

$$C_н = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} =$$

$$= 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{0{,}45}{16{,}05 + 12{,}5}} = 0{,}955.$$

По (13-124)

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1{,}6\delta C_н} =$$

$$= \frac{2\,900}{1{,}6 \cdot 0{,}045 \cdot 0{,}955} = 42\,200 \text{ гс}.$$

По рис. 13-33 для $B_{\Phi\delta} = 42\,200$ *гс* находим $\varkappa_\delta = 0{,}55$. По (13-126)

$$C_1 = (t_1 - b_{ш1})(1 - \varkappa_\delta) =$$

$$= (16{,}05 - 3{,}1)(1 - 0{,}55) = 5{,}83.$$

По (13-129)

$$\Delta\lambda_{1н} = \frac{h_{ш1} + 0{,}58h_3}{b_{ш1}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1{,}5b_{ш1}} =$$

$$= \frac{0{,}6 + 0{,}58 \cdot 1{,}08}{3{,}1} \cdot \frac{5{,}83}{5{,}83 + 1{,}5 \cdot 3{,}1} =$$

$$= 0{,}22.$$

По (13-130)

$$\lambda_{п1н} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{1н} = 1{,}26 - 0{,}22 = 1{,}04.$$

По (13-131)

$$\lambda_{д1н} = \lambda_{д1}\varkappa_\delta = 1{,}62 \cdot 0{,}55 = 0{,}89.$$

По (13-132)

$$\Sigma\lambda_{1н} = \lambda_{п1н} + \lambda_{д1н} + \lambda_{л1} = 1{,}04 +$$

$$+ 0{,}89 + 1{,}21 = 3{,}14.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора при учете насыщения от полей рассеяния по (13-133)

$$x_{1н} = x_1 \frac{\Sigma\lambda_{1н}}{\Sigma\lambda_1} = 1,04 \cdot \frac{3,14}{4,09} = 0,8.$$

По (13-134)

$$C_2 = (t_2 - b_{ш2})(1 - \varkappa_\delta) =$$
$$= (12,5 - 1,5)(1 - 0,55) = 4,95.$$

По (13-135)

$$\Delta\lambda_{2н} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}\left(\frac{C_2}{C_2 + b_{ш2}}\right) =$$
$$= \frac{0,4}{1,5}\left(\frac{4,95}{4,95 + 1,5}\right) = 0,205.$$

По (13-137)

$$\lambda_{п2\xi н} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{2н} = 2,606 - 0,205 = 2,4.$$

По (13-138)

$$\lambda_{д2н} = \lambda_{д2}\varkappa_\delta = 1,86 \cdot 0,55 = 1,02.$$

По (13-139)

$$\Sigma\lambda_{2\xi н} = \lambda_{п2\xi н} + \lambda_{д2н} + \lambda_{л2} = 2,4 +$$
$$+ 1,02 + 0,845 = 4,265.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора с учетом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

$$x'_{2\xi н} = x'_2 \frac{\Sigma\lambda_{2\xi н}}{\Sigma\lambda_2} = 1,02 \cdot \frac{4,265}{6,091} = 0,715 \text{ ом}.$$

Параметры короткого замыкания при учете вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния:

$$r_{к\xi} = 0,76 \text{ ом (п.81)}; \quad x_{к\xi н} =$$
$$= x_{1н} + x'_{2\xi н} = 0,8 + 0,715 = 1,515 \text{ ом};$$
$$z_{к\xi н} = \sqrt{r^2_{к\xi} + x^2_{к\xi н}} = \sqrt{0,76^2 + 1,515^2} =$$
$$= 1,7 \text{ ом}.$$

83. *Ток короткого замыкания*

$$I_{к.н} \approx \frac{U_{1н}}{z_{к\xi н}} = \frac{220}{1,7} = 130 \text{ а}.$$

[Полученное значение мало отличается от принятого в начале расчета (приблизительно на 6%); поэтому вторичного расчета не делаем.]

84. *Пусковой ток при s=1.* По (13-172)

$$x_{12к} = x_{12}\frac{F_{цепи}}{F_\delta} = 29,3 \cdot \frac{1\,055}{596} = 52 \text{ ом}$$

(пп. 62 и 47);

по (13-174)

$$c_{2\xi н} = 1 + \frac{x'_{2\xi н}}{x_{12к}} = 1 + \frac{0,715}{52} \approx 1,014;$$

по (13-178)

$$A' \approx 0; \; B' = s = 1: \; C' \approx -s\left(x'_{2\xi н} + x_{1н}\right) =$$
$$= -1 \cdot 1,515;$$

$$D' \approx sr_1 + r'_{2\xi} = 1 \cdot 0,36 + 0,4 = 0,76;$$

$$F' = \frac{s}{c_{2\xi н}} = \frac{1}{1,014} = 0,987;$$

по (13-179)

$$I_1 \approx \frac{U_{1н}s}{\sqrt{C'^2 + D'^2}} = \frac{220 \cdot 1}{\sqrt{1,515^2 + 0,76^2}} =$$
$$= 130 \text{ а};$$

$$I'_2 \approx \frac{1}{c_{2\xi н}} I_1 = 0,987 \cdot 130 \approx 128,5 \text{ а}.$$

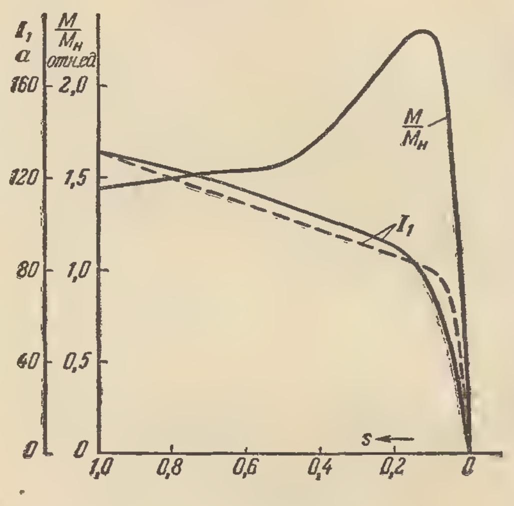


Рис. 13-56.

Кратность начального пускового тока

$$\frac{I_{нач}}{I_{1н}} = \frac{130}{25} = 5,2.$$

85. *Кратность начального пускового момента* по (13-180)

$$\frac{M_{нач}}{M_н} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2н}}\right)^2 \frac{r'_{2\xi}}{r'_2} \frac{s_н}{s} =$$
$$= \left(\frac{128,5}{22,7}\right)^2 \frac{0,4}{0,245} \cdot \frac{0,0272}{1} = 1,44.$$

86. *Пусковые характеристики.* Расчет токов и вращающих моментов для значений $s<1$ производится аналогично вышеприведенному расчету тех же величин для $s=1$.

Кривая $I_1=f(s)$, которая в последующем используется для определения параметров с учетом насыщения, в первом приближении построена на рис. 13-56 (пунктирная кривая).

Так как расчет пусковых характеристик носит приближенный характер, то ток $I_{1м}$ при критическом скольжении $s_к$ можно определить при помощи круговой диаграм-

мы (рис. 13-54); при

$$s_к = \frac{P_{э2}}{P_{эм.м}} = \frac{\overline{A'_м A''_м}}{\overline{A'_м A_м}} = 0{,}107 \text{ ток } I_{1м} = C_I \overline{OA}_м = 71 \ a.$$

Учитывая приближенно влияние насыщения от полей рассеяния, возьмем $I_{1м.н} \approx 1{,}14 \ I_{1м} = 1{,}14 \cdot 71 = 81$ *а*.

Построение кривой выполнено, как указывалось в § 13-9, б: от значения $I_1 = 81$ *а* при $s = 0{,}107$ до $I_{нач} = 130$ *а* при $s = 1$ приведена прямая линия.

Результаты сведены в табл. 13-22, где указаны значения скольжения, для которых производился расчет.

К расчету пусковых характеристик: $U_{1н} = 220$ *в*; $I_{1н} = 25$ *а*; $I'_{2н} = 22{,}7$ *а*; $r_1 = 0{,}36$ *ом*; $r'_2 = 0{,}245$ *ом*; $x_{12к} = 52$ *ом*; $c_{2\xi н} = 1{,}014$; $s_н = 0{,}0272$.

Пусковые характеристики, построенные по данным табл. 13-22, приведены на рис. 13-56 (еще раз отметим, что метод расчета характеристик является приближенным).

к) Превышения температуры

87. *Перепад температуры в пазовой изоляции* по (11-96)

$$\Theta_{и1} = \frac{A\Delta_c k_f t_1 \delta_{и1}}{\gamma_\vartheta \lambda_и \Pi_1} = \frac{312 \cdot 5{,}05 \cdot 1 \cdot 1{,}605 \cdot 0{,}075}{4\,070 \cdot 0{,}0010 \cdot 6{,}6} = 7° \ C$$

$$\Bigg[A = \frac{2m_1 w_1 I_{1н}}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 25}{\pi \cdot 18{,}4} = 312 \ a/см;$$

$$\Delta_c = \frac{25}{3 \cdot 1 \cdot 1{,}651} = 5{,}05 \ a/мм^2; \quad k_f = 1;$$

$t_1 = 1{,}605$ *см*: $\Pi_1 \approx 6{,}6$ *см* (по рис. 13-52); $\delta_{и1} = 0{,}075$ *см*; $\gamma_\vartheta = 4\,070$ (табл. 11-8);

$\lambda_и = 0{,}10 \cdot 10^{-2}$ (табл. 11-3) $\Bigg]$.

88. *Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-110)

$$\Theta_\alpha = \frac{q_c}{\alpha_v} = \frac{0{,}89}{16{,}1 \cdot 10^{-3}} = 55° \ C$$

$$\Bigg[\text{по (11-108а)} \ q_c = \frac{A\Delta_c k_f}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c1} + 0{,}5 P_{доб}}{\pi D l_1} = \frac{312 \cdot 5{,}05 \cdot 1}{4\,070} + \frac{280 + 0{,}5 \cdot 146}{\pi \cdot 18{,}4 \cdot 12{,}3} = 0{,}89 \ вт/см^2$$

при $P_{c1} = P_{c.c} + P_{cz} = 192 + 88 = 280$ *вт* (пп. 66 и 67); $P_{доб} \approx 0{,}01 \cdot \frac{13 \cdot 10^3}{0{,}89} = 146$ *вт*;

по (11-109) $\alpha_v = \alpha_0 (1 + 0{,}1 v) = 6{,}6 \cdot 10^{-3} (1 + 0{,}1 \cdot 14{,}45) = 16{,}1 \cdot 10^{-3}$ *вт/град·см²* при $v = 14{,}45$ *м/сек*].

89. *Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки стато-*

Таблица 13-22

Расчет пусковых характеристик

s	1,0	0,7	0,5	0,2	0,12	0,05
$r'_{2\xi}$	0,4	0,342	0,315	0 245	0,245	0,245
$x_{2\xi н}$	0,715	0,781	0,88	0,93	0,945	0,975
$x_{1н}$	0,80	0,84	0,87	0,88	0,90	0,96
$C' = s\left(x'_{2\xi н} + x_{1н}\right)$	1,515	1,13	0,875	0,362	0,22	0,097
$D' = sr_1 + r'_{2\xi}$	0,76	0,594	0,495	0,317	0,288	0,263
$I_1 = \frac{U_{1н} s}{\sqrt{C'^2 + D'^2}}$	130	124	109	92	73	39,3
$I'_2 = \frac{1}{c_{2\xi н}} I_1$	128,5	119,5	107,5	91	72	38,7
$\frac{I_1}{I_{1н}}$	5,2	4,95	4,37	3,64	2,92	1,55
$\frac{M}{M_н} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2н}}\right)^2 \frac{r'_{2\xi}}{r_1} \frac{s_н}{s}$	1,44	1,52	1,58	2,19	2,3	1,58

ра над температурой охлаждающего воздуха по (11-112)

$$\Theta_{л1}=\frac{q_{л1}}{1,33\cdot 10^{-3}(1+0,05v)}=$$

$$=\frac{0,095}{1,33\cdot 10^{-3}(1+0,05\cdot 14,45)}=41,5^\circ C$$

$$\left[\text{по (11-111)}\quad q_{л1}=\frac{A\Delta_c}{\gamma_\vartheta}\frac{t_1}{\Pi_1}=\right.$$

$$\left.=\frac{312\cdot 5,05}{4\,070}\cdot\frac{1,605}{6,6}=0,095\ вт/см^2\right].$$

90. *Среднее превышение температуры обмотки статора* по (11-113)

$$\Theta_c=\frac{(\Theta_{и1}+\Theta_\alpha)\,l_1+(\Theta_{и1}+\Theta_{л1})\,l_{л1}}{l_{ср}}=$$

$$=\frac{(7+55)\,12,3+(7+41,5)\,21,85}{12,3+21,85}=54^\circ C.$$

л) Весактивных материалов и показатели их использования

91. *Заготовительный вес электротехнической стали*

$$G_{ст}=(D_a+\Delta_{ст})^2\,lk_c\cdot 7,8\cdot 10^{-3}=$$

$$=(29,1+0,9)^2 12,3\cdot 0,95\cdot 7,8\cdot 10^{-3}=82\ кг$$

[припуск $\Delta_{ст}=9$ *мм* при штамповке из листов $600\times 1\,200$ *мм²* (см табл. 2-2)].

92. *Вес меди обмотки статора без изоляции*

$$G_{м\cdot с}=Z_1\,u_{п1}\,n_{эл}\,s_c\,l_{ср}\,\gamma_м\cdot 10^{-5}=$$

$$=36\cdot 20\cdot 3\cdot 1,651\cdot 34,15\cdot 8,9\cdot 10^{-5}=10,8\ кг.$$

93. *Вес обмотки статора с изоляцией* (при круглой меди)

$$G_{м\cdot с\cdot и}\approx\left[0,876+0,124\left(\frac{d_{из}}{d}\right)^2\right]G_{м\cdot с}=$$

$$=\left[0,876+0,124\left(\frac{1,56}{1,45}\right)^2\right]10,8=11\ кг.$$

94. *Вес стержней роторной обмотки*

$$G_{ал\cdot с}=Z_2\,s_c\,l_2'\,\gamma_{ал}\cdot 10^{-5}=$$

$$=46\cdot 103\cdot 12,8\cdot 2,6\cdot 10^{-5}=1,58\ кг.$$

95. *Вес короткозамыкающих колец роторной обмотки*

$$G_{ал\cdot к}=2\pi D_к\,s_к\,\gamma_{ал}\cdot 10^{-5}=$$

$$=2\pi\cdot 15,01\cdot 462\cdot 2,6\cdot 10^{-5}=1,13\ кг.$$

96. *Общий вес роторной обмотки*

$$G_{ал}=G_{ал\cdot с}+G_{ал\cdot к}=1,58+1,13=2,71\ кг.$$

(вес вентиляционных крыльев, отливаемых заодно с короткозамыкающими кольцами, при числе их 14, длине по оси ротора 5 *см*, средней радиальной высоте 2,8 *см* и средней толщине 0,63 *см*

$$G_{ал\cdot кр}=2\cdot 14\cdot 5\cdot 2,8\cdot 0,63\cdot 2,6\cdot 10^{-3}=$$

$$=0,64\ кг).$$

97. *Удельный вес активных материалов* при $2p=4$:

1) стали $g_{ст}=\dfrac{G_{ст}}{P_н}=\dfrac{82}{13}=6,3$ *кг/квт*;

2) меди $g_м=\dfrac{G_{м\cdot с}}{13}=\dfrac{10,8}{13}=0,83$ *кг/квт*;

3) алюминия $g_{ал}=\dfrac{G_{ал}}{P_н}=\dfrac{2,71}{13}=0,208$ *кг/квт*

(с учетом вентиляционных крыльев $g_{ал}'=$

$$=\frac{2,71+0,64}{13}=0,258\ кг/квт).$$

Б. Расчет двигателя с контактными кольцами

Проектное задание. Трехфазный двигатель с контактными кольцами (с фазным ротором): 250 *квт*; 380/660 *в*; 50 *гц*; 1 000 *об/мин*. Режим работы — продолжительный. Конструкция — защищенная, (нормальная серийная машина); $\eta_н=92,5\%$; $\cos\varphi_н=0,89$ (по табл. 13-3а; предварительные значения).

а) Главные размеры

1. *Число пар полюсов*

$$p=\frac{f_1\cdot 60}{n_1}=\frac{50\cdot 60}{1\,000}=3.$$

2. *Расчетная мощность* по (13-3)

$$P'=\frac{k_E\,P_н}{\eta_н\cos\varphi_н}=\frac{0,967\cdot 250}{0,925\cdot 0,89}=293\ ква.$$

3. *Внутренний и внешний диаметры статора.* По рис. 13-7 $D\approx 48$ *см*; по (13-9) $D_a\approx 1,41\,D=67,5$ *см*. Возьмем $D_a=66$ *см* (по табл. I-2); при этом $D=47$ *см* $(\approx D_a/1,41)$.

4. *Полюсное деление*

$$\tau=\frac{\pi D}{2p}=\frac{\pi\cdot 47}{6}=24,6\ см.$$

5. *Расчетная длина статора.* По рис. 13-1 выбираем: $A=435$ *а/см*; $B_\delta=7\,800$ *гс*. Предварительно $\alpha_\delta=0,715$; $k_B=1,09$; $k_{о1}=0,92$ В первом приближении по (13-13)

$$l_\delta=\frac{6,1\cdot 10^{11}\,P'}{\alpha_\delta\,k_B\,k_{о1}\,AB_\delta\,D^2\,n_1}=$$

$$=\frac{6,1\cdot 10^{11}\cdot 293}{0,715\cdot 1,09\cdot 0,92\cdot 435\cdot 7\,800\cdot 47^2\cdot 1\,500}=$$

$$=33,3\ см.$$

Сердечник статора разбиваем на шесть пакетов при $l_{пак}=5,5$ *см*; $n_в=5$; $b_в=1$ *см*. Следовательно, $l_\delta=l=l_{пак}(1+n_в)=5,5\cdot 6=$ $=33$ *см*. Полная длина сердечника статора

$$l_1=l+n_в\,b_в=33+5=38\ см.$$

При выбранных диаметрах статора D_a и D могут быть выполнены три машины на мощности $P_н=200$; 250; 320 *квт* с длинами $l_\delta\approx 26,5$: 33; 42 *см* при $l_\delta/\tau=1,12$; 1,34; 1,7, (При других нормализованных диаметрах

D_a получаются менее благоприятные отношения l_δ/τ.)

б) Обмотка, пазы и ярмо статора. Воздушный зазор

6. *Число пазов на полюс и фазу и общее число пазов статора.* Выбираем $q_1=4$; при этом $Z_1=6pq_1=6\cdot3\cdot4=72$.

7. *Зубцовое деление статора*

$$t_1=\frac{\pi D}{Z_1}=\frac{\pi\cdot 47}{72}=2{,}05 \text{ см}.$$

8. *Номинальный фазный ток*

$$I_{1н}=\frac{P_н\cdot 10^3}{m_1 U_1 \eta_н \cos\varphi_н}=$$

$$=\frac{250\cdot 10^3}{3\cdot 380\cdot 0{,}925\cdot 0{,}89}=267 \text{ а}.$$

9. *Число эффективных проводников в пазу* по (13-22)

$$u_{п1}=\frac{At_1 a_1}{I_{1н}}=\frac{435\cdot 2{,}05\cdot 3}{267}\approx 10.$$

Возьмем $u_{п1}=10$ при $n_{эл}=2$.

10. *Сечение и размеры проводника; размеры паза и зубца; изоляция обмотки.* Выбираем двухслойную петлевую обмотку с изоляцией класса B при полуоткрытых пазах. Ширина паза (предварительно) $b_{п1}\approx\approx 0{,}5\ t_1=0{,}5\cdot 2{,}05\approx 1$ *см*. По ширине паза укладываем два элементарных проводника, составляющих один эффективный.

Изоляцию выбираем в соответствии с табл. VII-4. С учетом припуска на штамповку толщина изоляции паза по ширине равна 2,2 *мм*. Следовательно, на два проводника остается 10—2,2=7,8 *мм*, а на один проводник 3,9 *мм*. Сечение проводника при плотности тока $\Delta_c\approx 5{,}1$ *а/мм²*

$$s_c'=\frac{I_{1н}}{a_1 n_{эл}\Delta_c}=\frac{267}{3\cdot 2\cdot 5{,}1}\approx 8{,}75 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод марки ПЭТВП с размерами согласно табл. IV-2 и IV-4: $s_c=$ $=8{,}79$ *мм²*; $\dfrac{a\cdot b}{a_{из}\cdot b_{из}}=\dfrac{2{,}44\cdot 3{,}8}{2{,}59\cdot 3{,}95}$.

Плотность тока $\Delta_c=\dfrac{267}{3\cdot 2\cdot 8{,}79}=5{,}07$ *а/мм²*.

Ширина паза $b_{п1}=2\cdot 3{,}95+2{,}2=10{,}1$ *мм*

Высота паза $h_{п1}=10\cdot 2{,}59+3{,}9+4{,}2=$ $=34$ *мм* (высота клина $h_к\approx 4{,}2$ *мм*).

На рис. 13-57 представлены чертеж паза и сечение лобовой части обмотки; в табл. 13-23 приведена спецификация паза и указана изоляция лобовой части обмотки.

11. *Число витков фазы* по (13-24)

$$w_1=pq_1\frac{u_{п1}}{a_1}=3\cdot 4\cdot\frac{10}{3}=40.$$

12. *Шаг обмотки*

$y\approx 0{,}83\quad \tau=0{,}83\cdot 3q_1;\quad$ выбираем $\quad y=10$ $(1\rightarrow 11)$;

$$\beta=\frac{y}{\tau}=\frac{10}{12}=0{,}833.$$

13. *Обмоточный коэффициент* (по приложению VIII) $k_{о1}=0{,}926$; $k_{y1}=0{,}966$; $k_{р1}=$ $=0{,}958$.

14. *Магнитный поток в воздушном зазоре* по (6-82)

$$\Phi=\frac{k_E U_1\cdot 10^8}{4k_B\ f_1 w_1 k_{о1}}=$$

$$=\frac{0{,}967\cdot 380\cdot 10^8}{4\cdot 1{,}09\cdot 50\cdot 40\cdot 0{,}926}=4{,}55\cdot 10^6 \text{ мкс}.$$

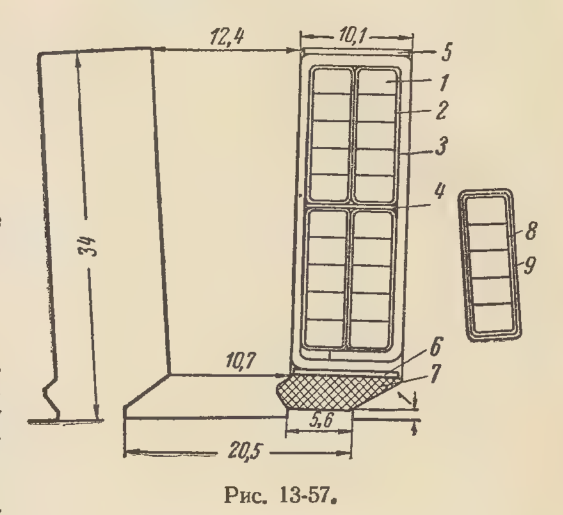


Рис. 13-57.

15. *Индукция в воздушном зазоре*

$$B_\delta=\frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta}=\frac{4{,}55\cdot 10^6}{0{,}715\cdot 24{,}6\cdot 33}=7\,850 \text{ гс}.$$

16. *Максимальная индукция в зубце*

$$B_{z1м}=\frac{B_\delta l_\delta t_1}{b_{z1} l k_c}=\frac{7\,850\cdot 33\cdot 2{,}05}{1{,}07\cdot 33\cdot 0{,}93}=16\,200 \text{ гс}.$$

17. *Высота ярма статора*

$$h_c=\frac{D_a-D}{2}-h_{z1}=\frac{66-47}{2}-3{,}4=6{,}1 \text{ см}.$$

18. *Индукция в ярме статора*

$$B_c=\frac{\Phi}{2h_c l k_c}=\frac{4{,}55\cdot 10^6}{2\cdot 6{,}1\cdot 33\cdot 0{,}93}=12\,200 \text{ гс}.$$

19. *Воздушный зазор* по рис. 13-15

$$\delta=1 \text{ мм}.$$

б) Обмотка, пазы и ярмо ротора

20. *Число пазов.* Выбираем $q_2=5$; следовательно, $Z_2=2pm_2q_2=6\cdot 3\cdot 5=90$.

21. *Внешний диаметр и зубцовое деление ротора*

$$D'=D-2\delta=47-2\cdot 0{,}1=46{,}8 \text{ см};$$

$$t_2=\frac{\pi D'}{Z_2}=\frac{\pi\cdot 46{,}8}{90}=1{,}635 \text{ см}.$$

22. *Число витков фазы w_2.* Выбираем двухслойную волновую обмотку с двумя

Спецификация паза и изоляция лобовой части обмотки статора

Позиция на рис. 13-57	Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод марки ПЭТВП: 2,44×3,8/2,59×3,95; 8,79 *мм²*	—	2	10	—	—
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	2×3	2×2	0,4	0,3
3	Лакослюдопласт	0,5	2	3	1,0	1,5
4	То же	0,5	—	1	—	0,5
5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
6	То же	0,5	—	1	—	0,5
7	Клин стеклотекстолитовый	3	—	—	—	—
	Допуск на укладку и припуск на штамповку	—	—	—	0,8	0,6
	Всего на паз без клина	—	—	—	2,2	3,9
8	Стеклолакоткань	0,15	1 вполнахлеста	1 вполнахлеста	0,6	0,6
9	Лента стеклянная	0,2	1 вполнахлеста	1 вполнахлеста	0,8	0,8
	Разбухание изоляции меди от промазки	—	—	—	0,1	0,2

стержнями в пазу при последовательном соединении всех витков фазы. При этом имеем:

$$w_2 = 2pq_2 = 6 \cdot 5 = 30.$$

23. *Обмоточный коэффициент*

$$k_{o2} = 0{,}957.$$

24. *Электродвижущая сила фазы*

$$E_2 = \frac{k_E U_1 w_2 k_{o2}}{w_1 k_{o1}} = \frac{0{,}967 \cdot 380 \cdot 30 \cdot 0{,}957}{40 \cdot 0{,}926} = 285 \text{ в}.$$

Выбираем соединение фаз в звезду; следовательно, напряжение на контактных кольцах

$$\sqrt{3}\, E_2 = \sqrt{3} \cdot 285 = 494 \text{ в}.$$

25. *Фазный ток ротора* по (13-27)

$$I_2 = k_I\, I_{1н} \frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}} = 0{,}93 \cdot 267 \frac{3 \cdot 40 \cdot 0{,}926}{3 \cdot 30 \cdot 0{,}957} = 320 \text{ а}.$$

26. *Сечение и размеры проводника; размеры паза и зубца; изоляция обмотки.* Для обмотки выбираем изоляцию класса В. При плотности тока $\Delta_р \approx 5{,}5$ *а/мм²* получим сечение проводника $s'_р = \frac{I_2}{\Delta_р} = \frac{320}{5{,}5} = 58{,}1$ *мм²*.

Возьмем прямоугольный стержень. Его ширину найдем, определив предварительно ширину паза: $b_п \approx 0{,}47\, t_2 = 0{,}47 \cdot 16{,}35 = 7{,}7$ *мм*.

При изоляции класса В по табл. VII-11 общая толщина пазовой изоляции с припуском на штамповку равна 2,4 *мм*. На медь приходится 7,7—2,4=5,3 *мм*. По табл. IV-4 подбираем провод с размерами 5,1×11,6=58,3 *мм²*. При этом $\Delta_р$=320/58,3=5,49 *а/мм²*. В соответствии с табл. VII-11 устанавливаем размеры паза и зубца ротора:

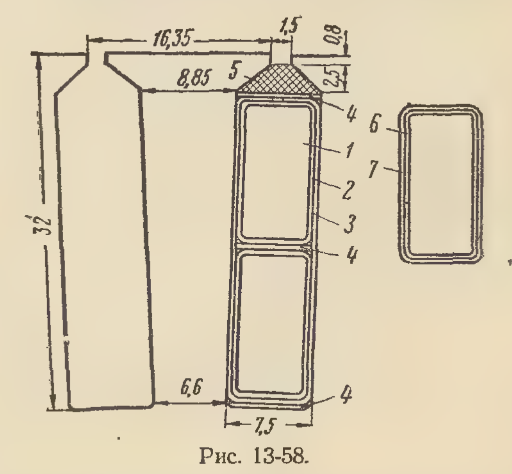


Рис. 13-58.

$$b_{п2} = 5{,}1 + 2{,}4 = 7{,}5 \text{ мм};$$

$$h_{z2} = 2 \cdot 11{,}6 + 5{,}5 + 3{,}3 = 32 \text{ мм}.$$

Таблица 13-24

Спецификация паза и изоляция лобовой части обмотки ротора

Позиция на рис. 13-58	Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
	Наименование	толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод 5,1×11,6; 58,3 *мм*²		1	2	—	—
	Лакировка стержней	—	—	—	0,1	2×0,1
2	Микафолий	0,2	3,5 оборота		1,4	2×1,4
3	Электронит	0,15	2	2	0,3	0,3
4	»	0,5	—	3	—	1,5
5	Клин стеклотекстолитовый	2,5	—	1	—	—
	Допуск на укладку и припуск на штамповку	—	—	—	0,6	0,7
	Всего на паз без клина	—	—	—	2,4	5,5
6	Микалента	0,17	1 слой вполнахлеста		0,68	0,68
7	Лента стеклянная	0,1	То же		0,4	0,4

На рис. 13-58 представлены чертеж паза и сечение лобовой части обмотки. В табл. 13-24 приведена спецификация паза и указана изоляция лобовой части обмотки.

27. *Максимальная индукция в зубце ротора*

$$B_{z2м} = \frac{B_\delta \, t_2 \, l_\delta}{b_{z2мин} \, l k_c} = \frac{7\,850 \cdot 1,635}{0,66 \cdot 0,93} = 20\,900 \text{ гс}.$$

28. *Высота ярма и внутренний диаметр ротора.* Пакеты ротора насаживаются непосредственно на вал. Диаметр вала выбираем $d_в = 16$ *см*. В листах ротора делаем ряд круглых отверстий диаметром 3 *см*. После сборки листов они образуют аксиальные каналы. В этом случае высота ярма ротора определяется по (6-55):

$$h_р = \frac{D' - D'_a + \frac{1}{6} D'_a}{2} - h_{z2} - \frac{2}{3} m_{a2} d_{a2} = \frac{46,8 - 16 + \frac{1}{6} \cdot 16}{2} - 3,2 - \frac{2}{3} \cdot 3 = 11,5 \text{ см}.$$

г) Намагничивающий ток

29. *Коэффициент воздушного зазора* по рис. 6-11

$$k_{\delta 1} = 1,157 \left(\text{для } \frac{b_{ш1}}{t_1} = \frac{5,6}{20,5} = 0,273 \text{ и } \frac{b_{ш1}}{\delta} = \frac{5,6}{1} = 5,6 \right);$$

$$k_{\delta 2} = 1,027 \left(\text{для } \frac{b_{ш2}}{t_2} = \frac{1,5}{16,35} = 0,092 \text{ и } \frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{1,5}{1} = 1,5 \right);$$

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,157 \cdot 1,027 = 1,19.$$

30. *Магнитное напряжение воздушного зазора* по (6-20)

$$F_\delta = 1,6 B_\delta \, k_\delta \, \delta = 1,6 \cdot 7\,850 \cdot 1,19 \cdot 0,1 = 1\,495 \text{ а}.$$

31. *Магнитное напряжение зубцов статора.* Выбираем сталь марки Э31. Найдем индукции в зубце — максимальную $B_{z1м}$, минимальную $B_{z1мин}$ и в среднем сечении зубца $B_{z1ср}$ (рис. 13-57):

$$B_{z1м} = 16\,200 \text{ гс (см. п. 16)};$$

$$B_{z1мин} = \frac{b_{z1мин}}{b_{z1м}} B_{z1м} = \frac{10,7}{12,4} \cdot 16\,200 = 13\,900 \text{ гс};$$

$$B_{z1ср} = \frac{10,7}{11,5} \cdot 16\,200 = 15\,100 \text{ гс}.$$

По табл. II-2 находим: $H_{z1м} = 67$ *а/см*; $H_{z1мин} = 13$ *а/см*; $H_{z1ср} = 33,7$ *а/см*.

По (6-31) $$H_{z1} = \frac{1}{6} (H_{z1м} + H_{z1мин} + 4 H_{z1ср}) = \frac{1}{6} (67 + 13 + 4 \cdot 33,7) = 35,8 \text{ а/см}.$$

По (6-21) $F_{z1} = 2 \, h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 3,4 \cdot 35,8 = 243$ *а*.

32. *Магнитное напряжение зубцов ротора.* $B_{z2м} = 20\,900$ *гс* (см. п. 27); $B_{z2мин} =$

$= \frac{6,6}{8,85} \cdot 20\,900 = 15\,600$ *гс* (рис. 13-58); $B_{z2ср} =$

$= \frac{7,72}{8,85} \cdot 20\,900 = 18\,200$ *гс*.

По табл. II-2 $H_{z2мин}=47,1$ *а/см*; $H_{z2ср} \approx$ ≈ 180 *а/см*; по рис. II-2 при $\frac{b_{п2}\, l_\delta}{k_c\, l b_{z2мин}} =$ $= \frac{7,5}{0,93 \cdot 6,6} = 1,22$ $H_{z2м}=590$ *а/см*.

$$H_{z2} = \frac{1}{6}(H_{z2м} + H_{z2мин} + 4H_{z2ср}) =$$

$$= \frac{1}{6}(590 + 47,1 + 4 \cdot 180) = 223 \text{ а/см};$$

$$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 3,2 \cdot 223 = 1\,420 \text{ а}.$$

33. *Коэффициент насыщения зубцов* по (6-83)

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} =$$

$$= \frac{1\,495 + 243 + 1\,420}{1\,495} = 2,1.$$

Так как полученное значение $k_z=2,1$ отличается от $k_z \approx 1,325$, повторяем расчет F_δ, F_{z1} и F_{z2}, взяв по пунктирной кривой рис. 6-20 $\alpha_\delta=0,761$ для $k_z=2,1$. Индукции изменяются в отношении 0,715/0,761; следовательно, получим:

$B_\delta = 7\,370$ *гс*, $F_\delta = 1\,405$ *а*; $B_{z1м}=15\,200$ *гс*; $B_{z1мин}=13\,050$ *гс*; $B_{z1ср}=14\,100$ *гс*; $H_{z1м}=36,1$ *а/см*; $H_{z1мин}=7,41$ *а/см*; $H_{z1ср}=15,3$ *а/см*; $H_{z1}=17,45$ *а/см*; $F_{z1}=118,5$ *а*; $B_{z2м}=19\,600$ *гс*; $B_{z2мин}=14\,650$ *гс*; $B_{z2ср}=17\,100$ *гс*; $H_{z2м}=340$ *а/см*; $H_{z2мин}=24$ *а/см*; $H_{z2ср}=110$ *а/см*; $H_{z2}=134$ *а/см*; $F_{z2}=857$ *а*; $k_z=1,69$.

34. *Магнитное напряжение ярма статора*. Индукция в ярме статора $B_c=12\,200$ *гс*. Средняя длина линий магнитной индукции

$$l_c = \frac{\pi(D_a - h_c)}{2p} = \frac{\pi(66 - 6,1)}{6} = 31,4 \text{ см}.$$

По табл. II-2 $H_c=4,87$ *а/см*; по рис. 6-17 $\zeta=0,4$; $F_c=\zeta H_c l_c=0,4 \cdot 4,87 \cdot 31,4=61$ *а*.

35. *Магнитное напряжение ярма ротора*

$$h_p = 11,5 \text{ см};$$

$$B_p \approx \frac{\Phi}{2h_p l k_c} = \frac{4,55 \cdot 10^6}{2 \cdot 11,5 \cdot 33 \cdot 0,93} = 6\,450 \text{ гс};$$

$$H_p = 0,98 \text{ а/см};$$

$$F_p = \zeta H_p l_p = 0,62 \cdot 0,98 \cdot 14,4 = 8,7 \text{ а},$$

$$\left[l_p = \frac{\pi(D'_a + h_p)}{2p} = \frac{\pi(16 + 11,5)}{6} = 14,4 \text{ см} \right].$$

36. *Намагничивающая сила магнитной цепи*

$$F_{цепи} = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_c + F_p =$$

$$= 1\,405 + 118,5 + 857 + 61 + 8,7 = 2\,450 \text{ а}.$$

37. *Общий коэффициент насыщения*

$$k_\mu = \frac{F_{цепи}}{F_\delta} = \frac{2\,450}{1\,405} = 1,745.$$

38. *Намагничивающий ток* по (6-85)

$$I_\mu = \frac{pF_{цепи}}{0,9 m_1 w_1 k_{01}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 2\,450}{0,9 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 0,926} = 73,4 \text{ а};$$

в процентах номинального тока

$$I_\mu\,\% = \frac{73,4}{267} 100 = 27,5\%.$$

д) Параметры двигателя (для рабочего режима)

39. *Длина лобовой части обмотки статора* по (14-17)

$$l_{л1} = A + 1,57H + 2M + N =$$

$$= 25,8 + 1,57 \cdot 1,3 + 2 \cdot 2,5 + 6 =$$

$$= 38,8 \text{ см} \; [\text{при } H = 5 \cdot 0,259 \approx 1,3 \text{ см};$$

$$a_3 \approx 1,2 \text{ см по (4-18)}$$

$$\tau_y = \frac{\pi(D + 2H + a_3)}{2p}\beta =$$

$$= \frac{\pi(47 + 2 \cdot 1,3 + 1,2)}{6} \cdot 0,833 = 22,1 \text{ см};$$

при $a_2 \approx 1,06$ *см* по (4-21)

$$t_c = \frac{\pi(D + a_2)}{Z_1} =$$

$$= \frac{\pi(47 + 1,06)}{72} = 2,22 \text{ см};$$

$$a_1 = \Delta_1 + \Delta_2 = 2 \cdot 0,16 + 0,3 = 0,62 \text{ см};$$

$$f_c = B + a_1 = 2 \cdot 0,38 + 0,62 =$$

$$= 1,38 \text{ см}; \quad \text{по (4-24)}$$

$$A = \frac{\tau_y - R - 0,5H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_c}\right)^2}} =$$

$$= \frac{22,1 - 1,2 - 0,5 \cdot 1,3}{\sqrt{1 - \left(\frac{1,38}{2,22}\right)^2}} = 25,8 \text{ см};$$

$$M = 2,5 \text{ см}; \quad N = 6 \text{ см}].$$

40. *Длина вылета лобовой части обмотки статора* по (4-25)

$$l_{в1} = 0,5A\frac{f_c}{t_c} + M + N =$$

$$= 0,5 \cdot 25,8 \frac{1,38}{2,22} + 2,5 + 6 = 16,6 \text{ см};$$

$$l'_{в1} \approx l_{в1} + 4B + 3 = 16,6 + 4 \cdot 0,76 + $$
$$+ 3 = 22,7 \text{ см}.$$

41. *Средняя длина полувитка обмотки статора*

$$l_{ср} = l_1 + l_{л1} = 38 + 38,8 = 76,8 \text{ см}.$$

42. *Общая длина проводников фазы обмотки статора на одну параллельную ветвь*

$$L_1 = 2w_1 l_{ср} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 40 \cdot 76,8 \cdot 10^{-2} =$$
$$= 61,5 \text{ м}.$$

43. *Активное сопротивление обмотки статора*

$$r_1 = \rho_{75} \frac{L_1}{s_с n_{эл} a_1} =$$
$$= \frac{1}{46} \cdot \frac{61,5}{8,79 \cdot 2 \cdot 3} = 0,0253 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$r_1^* = \frac{I_{1н} r_1}{U_1} = \frac{267 \cdot 0,0253}{380} = 0,0177.$$

44. *Длина лобовой части обмотки ротора* (по 4-27)

$$l_{л2} = A + (10 \div 15) = 30,4 + 10,6 = 41 \text{ см}$$

$$\Bigg[\tau_у = \frac{\pi (D' - h_{z2})}{2p} = \frac{\pi (46,8 - 3,2)}{6} =$$
$$= 22,8 \text{ см}; \quad t_с = \frac{\pi (D' - 2h_{z2})}{Z_2} =$$
$$= \frac{\pi (46,8 - 2 \cdot 3,2)}{90} = 1,41 \text{ см};$$

при $a_1 = \Delta_1 + \Delta_2 = 0,108 + 0,3 \approx 0,41$

$$f_с = B + a_1 = 0,52 + 0,41 = 0,93 \text{ см};$$

$$A = \frac{\tau_у}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_с}{t_с}\right)^2}} =$$
$$= \frac{22,8}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,93}{1,41}\right)^2}} = 30,4 \text{ см} \Bigg].$$

45. *Длина вылета лобовой части обмотки ротора* по (4-81)

$$l_{в2} \approx 0,5A \frac{f_с}{t_с} + M + N =$$
$$= 0,5 \cdot 30,4 \cdot \frac{0,93}{1,41} + 4 + 3,5 = 17,5 \text{ см}.$$

46. *Средняя длина полувитка обмотки ротора*

$$l_{ср} = l_2 + l_{л2} = 38 + 41 = 79 \text{ см } (l_2 = l_1).$$

47. *Общая длина проводников фазы обмотки ротора*

$$L_2 = 2w_2 l_{ср} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 30 \cdot 79 \cdot 10^{-2} = 47,3 \text{ м}.$$

48. *Активное сопротивление обмотки ротора*

$$r_2 = \rho_{75} \frac{L_2}{s_р a_2} = \frac{1}{46} \cdot \frac{47,3}{58,3 \cdot 1} = 0,0176 \text{ ом};$$

с учетом сопротивления переходных контактов щеток

$$r_2 = 0,0176 + 0,00219 = 0,01979 \text{ ом}$$

$$\Bigg[r_щ = \frac{\Delta U_щ}{I_2} = \frac{0,7}{320} =$$
$$= 0,00219 \text{ ом (щетки марки М20)} \Bigg];$$

приведенное к обмотке статора

$$r'_2 = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{01}}{w_2 k_{02}}\right)^2 =$$
$$= 0,01979 \cdot \frac{3}{3} \left(\frac{40 \cdot 0,926}{30 \cdot 0,957}\right)^2 =$$
$$= 0,01979 \cdot 1,665 = 0,0328 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$r_2'^* = \frac{I_{1н} r'_2}{U_1} = \frac{267 \cdot 0,0328}{380} = 0,023.$$

49. *Коэффициенты магнитной проводимости рассеяния статора:*

пазового по (7-24)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{п1}} k_\beta +$$
$$+ \left(\frac{h_2}{b_{п1}} + \frac{3h_3}{b_{п1} + b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}}\right) k'_\beta +$$
$$+ \frac{h_4}{4b_{п1}} = \frac{26,45 - 0,65}{3 \cdot 10,1} \cdot 0,906 +$$
$$+ \left(\frac{1,65}{10,1} + \frac{3 \cdot 2,5}{10,1 + 5,6} + \frac{1}{5,6}\right) 0,875 +$$
$$+ \frac{0,65}{4 \cdot 10,1} = 1,5$$

(по рис. 13-57 и табл. 13-23 $b_{п1} = 10,1$ *мм*; $h_1 = 26,45$ *мм*; $h_4 = 0,65$ *мм*; $h_2 = 1,65$ *мм*; $h_3 = 2,5$ *мм*; $h_{ш1} = 1$ *мм*; $b_{ш1} = 5,6$ *мм*; по рис. 7-8 $k_\beta = 0,906$; $k'_\beta = 0,875$);

дифференциального по (7-40)

$$\lambda_{д1} = 0,9 \frac{t_1 (q_1 k_{01})^2 \rho_{д1} k_{ш1}}{\delta k_\delta} \sigma_{д1} =$$
$$= 0,9 \cdot \frac{20,5 (4 \cdot 0,926)^2 1 \cdot 0,95}{1 \cdot 1,19} \cdot 0,0062 = 1,25$$

[$k_{ш1} \approx 0,95$ по (7-42); $\sigma_{д1} = 0,0062$ по табл. 7-2а];

лобовых частей по (7-45)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l'_\delta} (l_{л1} - 0,64 \beta_1 \tau) =$$
$$= 0,34 \cdot \frac{4}{35,5} (38,8 - 0,64 \times$$
$$\times 0,833 \cdot 24,6) = 0,98$$

$\left[\text{по (7-46) } l'_\delta = l_1 - 0{,}5 n_в b_в = \right.$

$\left. = 38 - 0{,}5 \cdot 5 \cdot 1 = 35{,}5 \text{ см}\right]$;

$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} = 1{,}5 + 1{,}25 + 0{,}98 = 3{,}73.$

50. *Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора* по (7-50)

$$x_1 = 0{,}158 \frac{f_1}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l'_\delta}{pq_1} \sum \lambda_1 =$$

$$= 0{,}158 \cdot \frac{50}{100}\left(\frac{40}{100}\right)^2 \frac{35{,}5}{3 \cdot 4} \cdot 3{,}73 = 0{,}14 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x_1^* = \frac{I_{1н} x_1}{U_1} = \frac{267 \cdot 0{,}14}{380} = 0{,}0985.$$

51. *Коэффициенты магнитной проводимости рассеяния ротора:*

пазового по (7-24)

$$\lambda_{п2} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{п2}} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_{п2}} + \frac{3h_3}{b_{п2} + b_{ш2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}\right) k'_\beta + \frac{h_4}{4b_{п2}} = \frac{25{,}2 - 2}{3 \cdot 7{,}5} \cdot 1 +$$

$$+ \left(\frac{1{,}35}{7{,}5} + \frac{3 \cdot 2{,}5}{7{,}5 + 1{,}5} + \frac{0{,}8}{1{,}5}\right) 1 + \frac{2}{4 \cdot 7{,}5} = 2{,}64$$

(размеры h_1, h_4, h_2, h_3, $h_{ш2}$, $b_{п2}$, $b_{ш2}$ по рис. 13-58 и табл. 13-24; $k_\beta = k'_\beta = 1$ при $\beta_2 = 1$);

дифференциального по (7-41)

$$\lambda_{д2} = 0{,}9 \frac{t_2 (q_2 k_{02})^2 \rho_{д1} k_{ш2}}{\delta k_\delta} \sigma_{д2} =$$

$$= 0{,}9 \cdot \frac{16{,}35 (5 \cdot 0{,}957)^2 1 \cdot 0{,}955}{1 \cdot 1{,}19} 0{,}0065 = 1{,}84;$$

лобовых частей по (7-45)

$$\lambda_{л2} = 0{,}34 \frac{q_2}{l''_\delta} (l_{л2} - 0{,}64 \beta_2 \tau) =$$

$$= 0{,}34 \cdot \frac{5}{35{,}5} (41 - 0{,}64 \cdot 1 \cdot 24{,}6) = 1{,}21;$$

$$\Sigma \lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2} = 2{,}64 + 1{,}81 + 1{,}21 = 5{,}69.$$

52. *Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора* по (7-51)

$$x_2 = 0{,}158 \frac{f_1}{100}\left(\frac{w_2}{100}\right)^2 \frac{l''_\delta}{pq_2} \sum \lambda_2 =$$

$$= 0{,}158 \cdot \frac{50}{100}\left(\frac{30}{100}\right)^2 \frac{35{,}5}{3 \cdot 5} \cdot 5{,}69 = 0{,}0955 \text{ ом};$$

приведенное к обмотке статора

$$x'_2 = x_2 \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{w_1 k_{01}}{w_2 k_{02}}\right)^2 = 0{,}0955 \cdot 1{,}665 = 0{,}159 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x'^*_2 = \frac{I_{1н} x'_2}{U_1} = \frac{267 \cdot 0{,}159}{380} = 0{,}1115.$$

53. *Индуктивное сопротивление взаимной индукции* по (13-48)

$$x_{12} = \frac{U_1 - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{380 - 73{,}4 \cdot 0{,}14}{73{,}4} = 4{,}9 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$x_{12}^* = \frac{I_{1н} x_{12}}{U_1} = \frac{267 \cdot 4{,}9}{380} = 3{,}44.$$

е) Потери в стали и механические

54. *Вес ярма статора*

$$G_c = \gamma h_c l k_c l_c (2p) \cdot 10^{-3} = 7{,}65 \cdot 6{,}1 \cdot 33 \times 0{,}93 \cdot 31{,}4 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 269 \text{ кг}.$$

[$\gamma \approx 7{,}65$ (см. табл. 2-1); $h_c = 6{,}1$ *см* (п. 17); $l_c = 31{,}4$ *см* (п. 34)].

55. *Вес зубцов статора*

$$G_{cz} = \gamma Z_1 h_{z1} b_{z1\,ср} l k_c \cdot 10^{-3} = 7{,}65 \cdot 72 \times 3{,}4 \cdot 1{,}15 \cdot 33 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3} = 66 \text{ кг}.$$

56. *Основные потери в стали ярма статора* по (8-24)

$$P_{c.c} = k_д p_{c.c} G_c \cdot 10^{-3} = 1{,}6 \cdot 3{,}11 \times 269 \cdot 10^{-3} = 1{,}34 \text{ квт}$$

[$k_д = 1{,}6$ (см. § 8-3, *а*); $p_{c.c} = 3{,}11$ *вт/кг* при $B_c = 12\,200$ *гс* по приложению III].

57. *Основные потери в стали зубцов статора* по (8-26)

$$P_{cz} = k_д p_{cz} G_{cz} \cdot 10^{-3} = 1{,}8 \cdot 4{,}27 \times 66 \cdot 10^{-3} = 0{,}51 \text{ квт}$$

[$k_д = 1{,}8$ (см. § 8-3, *б*) $p_{cz} = 4{,}27$ *вт/кг* при $B_{z1ср} = 14\,100$ *гс* (п. 33) по приложению III].

Поверхностными и пульсационными потерями в зубцах статора пренебрегаем.

58. *Поверхностные потери в зубцах ротора* по (8-31)

$$P_{пов.р} = 2p\tau \frac{t_2 - b_{ш2}}{t_2} l p_{пов.р} \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 24{,}6 \cdot \frac{1{,}635 - 0{,}15}{1{,}635} \cdot 33 \times 600 \cdot 10^{-7} = 0{,}27 \text{ квт}$$

[по (8-30)

$$p_{пов.р} = 0{,}5 K_0 \left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000}\right)^{1{,}5} \left(\frac{B_0 t_1}{1\,000}\right)^2 =$$

$$= 0{,}5 \cdot 1{,}7 \left(\frac{72 \cdot 1\,000}{10\,000}\right)^{1{,}5} \left(\frac{2\,900 \cdot 2{,}05}{1\,000}\right)^2 = 600 \text{ вт/м}^2$$

{из табл. 8-1 $K_0=1{,}7$; по (8-27) $B_0=\beta_0 k_\delta B_\delta = 0{,}33\cdot1{,}19\cdot7\,370=2\,900$ *гс*, где $\beta=0{,}33$ по рис. 8-4 для $\frac{b_{ш1}}{\delta}=\frac{5{,}6}{1}=5{,}6$)].

59. *Пульсационные потери в зубцах ротора* по (8-32)

$$P_{пул.р}\approx 0{,}09\left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000}\frac{B_{пул.р}}{1\,000}\right)^2 G_{pz}\cdot10^{-3} = 0{,}09\left(\frac{72\cdot1\,000}{10\,000}\cdot\frac{1\,550}{1\,000}\right)^2 52{,}2\cdot10^{-3}\approx 0{,}6 \text{ квт}$$

[по (8-33)

$$B_{пул.р}\approx\frac{\gamma_c\delta}{2t_2}B_{z\,2ср} = \frac{2{,}96\cdot0{,}1}{2\cdot1{,}635}\cdot17\,100 = 1\,550 \text{ гс},$$

где

$$\gamma_c = \frac{\left(\frac{b_{ш1}}{\delta}\right)^2}{5+\frac{b_{ш1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{5{,}6}{1}\right)^2}{5+\frac{5{,}6}{1}} = 2{,}96;$$

$$B_{z\,2ср} = 17\,100 \text{ гс (п. 33)};$$

$$G_{pz}=\gamma Z_2 h_{z2} b_{z\,2ср} l k_c\cdot10^{-3} = 7{,}65\cdot90\times 3{,}2\cdot0{,}772\cdot33\cdot0{,}93\cdot10^{-3} = 52{,}5 \text{ кг}].$$

60. *Общие потери в стали*

$$P_c = P_{c.c}+P_{cz}+P_{пов.р}+P_{пул.р} = 1{,}34+0{,}51+0{,}27+0{,}6=2{,}72 \text{ квт}.$$

61. *Механические потери* на трение в подшипниках и вентиляцию по (8-18)

$$P'_{мех}=1{,}2\cdot2p\left(\frac{\tau}{10}\right)^3(n_в+11)\,10^{-3} = 1{,}2\cdot6\left(\frac{24{,}6}{10}\right)^3(5+11)\,10^{-3} = 1{,}72 \text{ квт};$$

на трение щеток о контактные кольца по (8-8)

$$P_{мех.щ}=9{,}81k_{тр}p_щ S_щ v_к\cdot10^{-3} = 9{,}81\cdot0{,}165\cdot0{,}21\cdot115\cdot10{,}45\cdot10^{-3}\approx 0{,}41 \text{ квт}$$

(по табл. 2-8 для щеток марки М20 $k_{тр}\approx 0{,}165$; $p_щ\approx0{,}21$ *кГ/см²*; размеры контактного кольца: $D_к=200$ *мм*, $b_к=20$ *мм*; на кольцо шесть щеток с размерами по табл. V-1 $2{,}0\times3{,}2=6{,}4$ *см²*; следовательно, $S_щ = 3\cdot6\cdot6{,}4=115$ *см²*; $v_к=\frac{\pi\cdot0{,}20\cdot1\,000}{60} = 10{,}45$ *м/сек*);

общие потери

$$P_{мех}=P'_{мех}+P_{мех.щ}=1{,}72+0{,}41=2{,}13 \text{ квт}.$$

ж) Рабочие характеристики

При определении рабочих характеристик будем пользоваться аналитическим методом (§ 13-19, *а*, п. 2). При этом необходимо иметь значения следующих величин: $r_1=0{,}0253$ *ом*; $r'_2=0{,}0328$ *ом*; $x_1=0{,}14$ *ом*; $x'_2=0{,}159$ *ом*; $x_{12}=4{,}9$ *ом*; $c_1\approx1+\frac{x_1}{x_{12}}=1+\frac{0{,}14}{4{,}9}=1{,}0286$ [углом γ_1 пренебрегаем, так как его значение, рассчитанное по (13-164), приблизительно равно —15′]; $I_{c.р}\approx I_\mu = 73{,}4$ *а*; $P_{c1}=P_{c.c}+P_{cz}=1{,}34+0{,}51 = 1{,}85$ *квт*; $I_{ca}=\frac{P_{c1}\cdot10^3+3I_\mu^2 r_1}{3U_1} = \frac{1{,}85\cdot10^3+3\cdot73{,}4^2\cdot0{,}0253}{3\cdot380}=1{,}98$ *а*;

$P_{c.д}=P_{пов.р}+P_{пул.р}=0{,}27+0{,}6=0{,}87$ *квт*; $P_{мех}=2{,}13$ *квт*; $s_н\approx r'^*_2=0{,}023$.

При $\gamma_1=0$ получим: $a'=c_1^2$; $b'=0$; $a = c_1 r_1$; $b=c_1x_1+c_1^2x'_2$. Для определения рабочих характеристик в соответствии с табл. 13-14 и указанными значениями a', b', a и b составляем табл. 13-25 и по приведенным в ней формулам рассчитываем необходимые величины.

При холостом ходе имеем:

$$P_0=P''_0+3I_\mu^2 r_1\cdot10^{-3}=4{,}85+3\cdot73{,}4^2\cdot0{,}0253\cdot10^{-3}=5{,}3 \text{ квт}.$$

$$\left(P''_0=P_{c1}+P_{c.д}+P_{мех} = 1{,}85+0{,}87+2{,}13=4{,}85 \text{ квт}\right);$$

$$I_{0a}=\frac{P_0\cdot10^3}{3U_1}=\frac{5{,}3\cdot10^3}{3\cdot380}=4{,}66 \text{ а};$$

$$I_0=\sqrt{I_{0a}^2+I_\mu^2}=\sqrt{4{,}66+73{,}4^2}=73{,}5 a;$$

$$\cos\varphi_0=\frac{I_{0a}}{I_0}=\frac{4{,}66}{73{,}5}=0{,}0636.$$

По данным расчета, приведенным в табл. 13-25, на рис. 13-59 построены рабочие характеристики двигателя.

з) Номинальные величины. Кратность максимального вращающего момента

Из рис. 13-59 для $P_{2н}=250$ *квт* находим: $I_{1н}=263$ *а*; $\eta_н=0{,}935$; $\cos\varphi_н=0{,}89$; $s_н = 2{,}23\%$; $I'_{2н}=242$ *а*.

Для определения кратности максимального момента сначала найдем критическое скольжение по (13-167):

$$s_к=\frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_1}+x'_2}=\frac{0{,}0328}{\frac{0{,}14}{1{,}0286}+0{,}159}=0{,}111;$$

Таблица 13-25

Данные расчета рабочих характеристик

№ пункта	Величины	s = 0,004	0,010	0,015	0,020	0,023	0,026
1	$c_1^2 \frac{r_2'}{s}$, *ом*	8,67	3,47	2,31	1,735	1,51	1,335
2	—	—	—	—	—	—	—
3	$R = c_1 r_2 + c_1^2 \frac{r_2''}{s}$, *ом*	8,696	3,496	2,336	1,761	1,536	1,361
4	$X = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'$, *ом*	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312
5	$z = \sqrt{R^2 + X^2}$, *ом*	8,7	3,50	2,36	1,79	1,57	1,398
6	$\cos \varphi_2' = \frac{R}{z}$	1	1	0,99	0,984	0,98	0,975
7	$\sin \varphi_2' = \frac{X}{z}$	0,0362	0,089	0,132	0,174	0,199	0,223
8	$I_2'' = \frac{U_1}{z}$, *а*	43,7	108,5	161	212	242	272
9	$I_2' = c_1 I_2''$, *а*	45	111,5	165,5	218	249	280
10	$I_{1а} = I_{с.а} + I_2'' \cos \varphi_2'$, *а*	45,68	110,5	161,5	210,2	239	267
11	$I_{1р} = I_{с.р} + I_2'' \sin \varphi_2'$, *а*	75	83,1	94,6	110,5	121,7	136,8
12	$I_1 = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}$, *а*	87,7	138,3	187	238	268	300
13	$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1а}}{I_1}$	0,523	0,80	0,865	0,89	0,89	0,89
14	$P_1 = 3U_1 I_{1а} \cdot 10^{-3}$, *квт*	52,2	126	184	242	272	304
15	$P_{э1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$, *квт*	0,585	1,45	2,66	4,29	5,47	6,85
16	$P_{э2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$, *квт*	0,199	1,21	2,70	4,67	6,10	7,70
17	$P_0'' = P_{с1} + P_{с.д} + P_{мех}$, *квт*	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
18	$P_{доб} \approx 0,005 P_{1н} \left(\frac{I_1}{I_{1н}}\right)^2$, *квт*	0,145	0,364	0,665	1,07	1,365	1,71
19	$\Sigma P = P_{э1} + P_{э2} + P_0'' + P_{мех}$, *квт*	5,78	7,87	10,97	14,88	17,79	21,15
20	$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$	0,889	0,937	0,94	0,938	0,935	0,93
21	$P_2 = P_1 - \Sigma P$, *квт*	46,7	118,1	173,0	227,1	254,2	282,8

затем по пп. 1—5, 8 и 9 табл. 13-25 рассчитаем ток при $s_к = 0,111$: $I_{2м}' = 845$ *а*. По (13-166) получим:

$$\frac{M_м}{M_н} = \left(\frac{I_{2м}'}{I_{2н}'}\right)^2 \frac{s_н}{s_к} = \left(\frac{845}{242}\right)^2 \frac{0,0223}{0,111} = 2,42$$

(из-за насыщения от полей рассеяния кратность $M_м/M_н$ возрастает примерно на 15—20%).

и) Превышения температуры

62. *Перепад температуры в пазовой изоляции* по (11-96)

$$\Theta_{и1} = \frac{A \Delta_с k_f t_1 \delta_{и1}}{\gamma_\vartheta \lambda_и \Pi_1} = \frac{427 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 2,05 \cdot 0,11}{4\,020 \cdot 0,0010 \cdot 8,22} = 14,6°\,С$$

$$\left[A = \frac{2 m_1 w_1 I_{1н}}{\pi D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 263}{\pi \cdot 47} = 427 \text{ а/см};\right.$$

$$\Delta_c = \frac{I_{1н}}{a_1 n_{эл} s_c} = \frac{263}{3 \cdot 2 \cdot 8,79} = 5 \ а/мм^2;$$

$k_f = 1$; $t_1 = 2,05$ *см*; $\Pi_1 = 2(b_{п1} + h_{п1} - h_к) = 2(1,01 + 3,4 - 0,3) = 8,22$ *см*; $\delta_{и1} = 0,11$ *см* (табл. 13-23); $\gamma_\vartheta = 4\,020$ (табл. 11-8); $\lambda_и = 0,10 \cdot 10^{-2}$ (табл. 11-3)].

63. *Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-110)

$$\Theta_\alpha = \frac{q_c}{\alpha_v} = \frac{0,98}{22,8 \cdot 10^{-3}} = 43° \ C$$

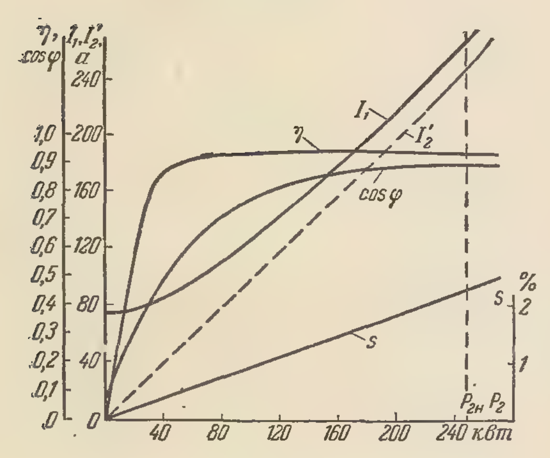


Рис. 13-59.

$$\left[\text{по (11-108а)} \quad q_c = \frac{A \Delta_c k_f}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c1} + 0,5 P_{доб}}{\pi D l_1} = \frac{427 \cdot 5 \cdot 1}{4\,020} + \frac{1\,850 + 0,5 \cdot 1\,335}{\pi \cdot 47 \cdot 38} = 0,98 \ вт/см^2\right.$$

при $P_{c1} = P_{c.c} + P_{cz} = 1\,340 + 510 = 1\,850$ *вт* (пп. 55 и 56); $P_{доб} = 0,005 \dfrac{250 \cdot 10^3}{0,935} = 1\,335$ *вт*; по (11-109) $\alpha_v = \alpha_0(1 + 0,1\ v) = 6,6 \cdot 10^{-3}(1 + 0,1 \cdot 24,6) = 22,8 \cdot 10^{-3}$ *вт/град* $\times$ $\times$ *см*² при $v = 24,6$ *м/сек*].

64. *Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-112)

$$\Theta_{л1} = \frac{q_{л1}}{1,33 \cdot 10^{-3}(1 + 0,05v)} = \frac{0,133}{1,33 \cdot 10^{-3}(1 + 0,05 \cdot 24,6)} = 45° \ C$$

$$\left[\text{по (11-111)} \ q_{л1} \approx \frac{\Delta_c A}{\gamma_\vartheta} \frac{t_1}{\Pi_1} = \frac{5 \cdot 427}{4\,020} \cdot \frac{2,05}{8,22} = 0,133 \ вт/см^2\right].$$

65. *Среднее превышение температуры обмотки статора* по (11-113)

$$\Theta_c = \frac{(\Theta_{и1} + \Theta_\alpha)\, l_1 + (\Theta_{и1} + \Theta_{л1})\, l_{л1}}{l_{ср}} = \frac{(14,6 + 43)\, 38 + (14,6 + 45)\, 38,8}{76,8} = 59° \ C.$$

66. *Перепад температуры в пазовой изоляции ротора* по (11-96)

$$\Theta_{и2} = \frac{A_р \Delta_р t_2 \delta_{и2}}{\gamma_\vartheta \lambda_и \Pi_2} = \frac{381 \cdot 5,35 \cdot 1,635 \cdot 0,12}{4\,020 \cdot 0,0016 \cdot 7,4} = 8,4° \ C$$

$$\left[A_р = \frac{I_{2н} u_{п2}}{a_2 t_2} = \frac{312 \cdot 2}{1 \cdot 1,635} = 381 \ а/см;\right.$$

$$\Delta_р = \frac{I_{2н}}{s_р} = \frac{312}{58,3} = 5,35 \ а/мм^2 \ \text{при} \ I_{2н} = I'_{2н} \frac{w_1 k_{о1}}{w_2 k_{о2}} = 242 \cdot \frac{40 \cdot 0,926}{30 \cdot 0,957} = 312 \ а;$$

$$\left.\Pi_2 = 2(b_{п2} + h_{п2} - h_к) = 2(0,75 + 3,2 - 0,25) = 7,4 \ см; \quad \delta_{и2} = 0,12 \ см\right].$$

67. *Превышение температуры внешней поверхности ротора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-116)

$$\Theta_\alpha = \frac{q_р}{\alpha_v} = \frac{0,786}{12,1 \cdot 10^{-3}} = 65° \ C$$

$$\left[\text{по (11-114)} \ q_р = \frac{A_р \Delta_р}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c2} + 0,5 P_{доб}}{\pi D l_1} = \frac{381 \cdot 5,35}{4\,020} + \frac{870 + 0,5 \cdot 1335}{\pi \cdot 47 \cdot 38} = 0,786 \ вт/см^2\right.$$

при $P_{c2} = P_{c.д} = 870$ *вт*; по (11-115)

$$\left.\alpha_v \approx 3,5 \cdot 10^{-3}(1 + 0,1 \cdot 24,6) = 12,1 \cdot 10^{-3} \ вт/град \cdot см^2\right].$$

68. *Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки ротора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-103)

$$\Theta_{л2} = \frac{q_{л2}}{\alpha_v} = \frac{0,71}{10,35 \cdot 10^{-3}} = 68,5° \ C$$

$$\left[\text{по (11-101)} \ q_{л2} = \frac{1,4 A_р \Delta_р}{\gamma_\vartheta} = \frac{1,4 \cdot 381 \cdot 5,35}{4\,020} = 0,71 \ вт/см^2;\right.$$

$$\left.\text{по (11-102)} \ \alpha_v = 3 \cdot 10^{-3}(1 + 0,1 \cdot 24,6) = 10,35 \cdot 10^{-3} \ вт/град \cdot см^2\right].$$

69. *Среднее превышение температуры обмотки ротора* по (11-117)

$$\Theta_р = \frac{(\Theta_{и2} + \Theta_\alpha)\, l_2 + \Theta_{л2}\, l_{л2}}{l_{ср}} = \frac{(8,4 + 65)\, 38 + 68,5 \cdot 41}{79} = 71° \ C.$$

к) Вес активных материалов и показатели их использования

70. *Заготовительный вес стали*

$$G_{ст}\,[D_a+(1\div 2)]^2\, l k_c\, \gamma_c\cdot 10^{-3}=$$

$$=(66+1)^2\, 33\cdot 0{,}93\cdot 7{,}65\cdot 10^{-3}=1\,055\ кг.$$

71. *Вес меди обмотки статора*

$$G_{м\cdot с}=Z_1\, u_{п1}\, n_{эл}\, s_c\, l_{ср}\, \gamma_м\cdot 10^{-5}=$$

$$=72\cdot 10\cdot 2\cdot 8{,}79\cdot 76{,}8\cdot 8{,}9\cdot 10^{-5}=85{,}5\ кг.$$

72. *Вес меди обмотки ротора*

$$G_{м\cdot р}=Z_2\, u_{п2}\, n_{эл}\, s_р\, l_{ср}\, \gamma_м\cdot 10^{-5}=$$

$$=90\cdot 2\cdot 1\cdot 58{,}3\cdot 79\cdot 8{,}9\cdot 10^{-5}=74\ кг.$$

73. *Удельный вес активных материалов* при $2p=6$:

1) заготовительный вес стали на единицу мощности

$$g_{ст}=\frac{G_{ст}}{P_н}=\frac{1\,055}{250}=4{,}225\ кг/квт;$$

2) вес меди на единицу мощности

$$g_м=\frac{G_{м\cdot с}+G_{м\cdot р}}{P_н}=$$

$$=\frac{85{,}5+74}{250}=0{,}636\ кг/квт.$$

В. Расчеты короткозамкнутых двигателей 250 *квт*

Здесь на примерах расчета указывается, в какой последовательности можно рассчитывать короткозамкнутые двигатели, имеющие роторы с глубокими, клинообразными пазами или с двойной клеткой, при заданных кратностях начальных пусковых момента и тока.

Примем, что все двигатели должны иметь те же основные номинальные величины, как и двигатель с контактными кольцами в предыдущем примере расчета (250 *квт*, 380/660 *в*, 50 *гц*, 1 000 *об/мин*).

Будем считать, что для двигателей с глубокими и клинообразными пазами заданы кратности начальных пусковых момента и тока

$$m_{нач}=\frac{M_{нач}}{M_н}\approx 1{,}4 \text{ и } i_{нач}=\frac{I_{нач}}{I_н}\approx 6,$$

а для двигателя с двойной клеткой $m_{нач}\approx\approx 1{,}7$ и $i_{нач}\approx 5$; при этом к. п. д. не должен заметно отличаться от к. п. д. двигателя с контактными кольцами, тогда как для $\cos\varphi$ и $M_м$ допустимо некоторое снижение.

Обмотку, пазы и ярмо статора возьмем такими же, как в предыдущем примере. Поэтому рассчитанные в этом примере величины, относящиеся к статору, могут быть приближенно оставлены без изменения для всех рассматриваемых в дальнейшем двигателей.

а) Ротор с глубокими пазами

1. *Номинальный ток статора.* Предварительно примем уменьшение $\cos\varphi$ до $\cos\varphi_н=0{,}875$; значение η оставляем без изменения. При этом получим:

$$I_{1н}=263\cdot\frac{0{,}89}{0{,}875}=268\ а.$$

2. *Число пазов ротора* выбираем по табл. 13-7: $Z_2=82$.

3. *Ток ротора* (ток стержня) по (13-36)

$$I_{2н}=I_c=k_I\, I_{1н}\frac{6w_1\, k_{o1}}{Z_2}=$$

$$=0{,}91\cdot 268\cdot\frac{6\cdot 40\cdot 0{,}926}{82}=660\ а$$

(при $k_I=0{,}91$ по рис. 13-11).

4. *Ток в короткозамыкающем кольце по* (13-38)

$$I_к=I_c\,\frac{1}{\Delta}=660\cdot\frac{1}{0{,}229}=2\,880\ а$$

$$\left(\text{при } \Delta=2\sin\frac{\pi p}{Z_2}=2\sin\frac{\pi\cdot 3}{82}=0{,}229\right).$$

5. *Сечение стержня*

$$s_c=\frac{I_c}{\Delta_c}=\frac{660}{6{,}5}=101{,}5\ мм^2$$

(при $\Delta_c=6{,}5\ а/мм^2$).

6. *Сопротивление стержня*

$$r_c=\rho_{75}\,\frac{l'_2\cdot 10^{-2}}{s_c}=\frac{1}{46}\cdot\frac{43\cdot 10^{-2}}{101{,}5}=$$

$$=9{,}2\cdot 10^{-5}\ ом$$

$$(l'_2=l_2+2\cdot 2{,}5=38+5=43\ см).$$

7. *Размеры короткозамыкающего кольца*

$$s_к=\frac{I_к}{\Delta_к}=\frac{2\,880}{4{,}8}=600\ мм^2;\ a\cdot b=15\cdot 40\ мм^2$$

(при $\Delta_к=4{,}8\ а/мм$).

8. *Сопротивление части короткозамыкающего кольца между соседними стержнями*

$$r_к=\rho_{75}\,\frac{l_к\cdot 10^{-2}}{s_к}=\frac{1}{46}\cdot\frac{1{,}64\cdot 10^{-2}}{600}=$$

$$=0{,}0595\cdot 10^{-5}\ ом$$

$$\left[l_к=\frac{\pi D_к}{Z_2}=\frac{\pi\,(46{,}8-4)}{82}=1{,}64\ см\right].$$

9. *Сопротивление обмотки ротора* при $s\approx 0$

$$r_2=r_c+\frac{2r_к}{\Delta^2}=\left(9{,}2+\frac{2\cdot 0{,}0595}{0{,}299^2}\right)10^{-5}=$$

$$=(9{,}2+2{,}27)\,10^{-5}=11{,}47\cdot 10^{-5}\ ом;$$

$$r'_2=r_2\,\frac{12\,w_1^2\,k_{o1}^2}{Z_2}=$$

$$=11{,}47\cdot 10^{-5}\cdot\frac{12\cdot 40^2\cdot 0{,}926^2}{82}=$$

$$=11{,}47\cdot 10^{-5}\cdot 201=0{,}0231\ ом:$$

$$r_2'^* = \frac{I_{1н} r_2'}{U_1} = \frac{268 \cdot 0{,}0231}{380} = 0{,}0163.$$

10. *Скольжение при номинальной нагрузке* $s_н \approx r_2'^* = 0{,}0163$ (следовательно, электрические потери в обмотке ротора будут меньше, чем те же потери двигателя с контактными кольцами).

11. *Сопротивление обмотки ротора при пуске* ($s=1$)

$$r_{2\xi} = r_2 \frac{M_{нач}}{M_н} \left(\frac{I_{2н}'}{I_{2нач}'} \right)^2 \frac{s}{s_н} =$$

$$= 11{,}47 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}4 \left(\frac{1}{6} \right)^2 \frac{1}{0{,}0163} =$$

$$= 27{,}4 \cdot 10^{-5} \ ом$$

$$\left[\text{см. (13-180)}; \ \frac{I_{2нач}'}{I_{2н}'} \approx \frac{I_{нач}}{I_{1н}} = 6 \right];$$

$$r_{2\xi}' = 27{,}4 \cdot 10^{-5} \cdot 201 = 0{,}055 \ ом \ (\text{см. п. 9}).$$

12. *Сопротивление пазовой части стержня при* $s=1$

$$r_{с.п\xi} = r_{2\xi} - r_с \frac{l_2' - l}{l_2'} - \frac{2r_к}{\Delta^2} =$$

$$= \left(27{,}4 - 9{,}2 \cdot \frac{43 - 33}{43} - 2{,}27 \right) 10^{-5} =$$

$$= 22{,}3 \cdot 10^{-5} \ ом;$$

следовательно, сопротивление пазовой части стержня должно увеличиться из-за вытеснения тока в

$$\frac{r_{с.п\xi}}{r_{с.п}} = \frac{22{,}3 \cdot 10^{-5}}{9{,}2 \cdot \frac{33}{43} \cdot 10^{-5}} = 3{,}16 \ \text{раза}.$$

13. *Размеры стержня.* Высота стержня должна быть равна (см. § 13-7, в. п. 1) $a = h = 3{,}16 \cdot 11{,}1 = 35$ *мм*; ширина стержня

$$b = \frac{s_с}{h} = \frac{101{,}5}{35} = 2{,}9 \ мм.$$

14. *Полное сопротивление двигателя* при $s=1$ (приближенно)

$$z_{к\xi н} = \frac{U_1}{I_{нач}} = \frac{380}{6 \cdot 268} = 0{,}236 \ ом.$$

15. *Активное сопротивление двигателя* при $s=1$

$$r_{к\xi} = r_1 + r_{2\xi}' = 0{,}0253 + 0{,}055 =$$

$$= 0{,}0803 \ ом.$$

16. *Индуктивное сопротивление двигателя* при $s=1$

$$x_{к\xi н} = \sqrt{z_{к\xi н}^2 - r_{к\xi}^2} =$$

$$= \sqrt{0{,}236^2 - 0{,}0803^2} = 0{,}222 \ ом.$$

17. *Индуктивное сопротивление рассеяния статора* при $s=1$ с учетом насыщения от полей рассеяния (см. § 13-7, г)

$$F_{п.ср} = 0{,}7 \frac{I_{к.н} u_{п1}}{a_1} \left(k_\beta + k_{у1} k_{о1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0{,}7 \cdot \frac{6 \cdot 268 \cdot 10}{3} \left(0{,}88 + 0{,}966 \cdot 0{,}926 \cdot \frac{72}{82} \right) =$$

$$= 6\,270 \ а;$$

$$C_н = 0{,}64 + 2{,}5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} =$$

$$= 0{,}64 + 2{,}5 \sqrt{\frac{0{,}1}{2{,}05 + 1{,}79}} = 1{,}043;$$

$$B_{Ф\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1{,}6\,\delta\,C_н} = \frac{6\,270}{1{,}6 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}043} = 37\,500 \ гс;$$

по рис. 13-33 $\varkappa_\delta = 0{,}6$; по (13-126)

$$C_1 = (t_1 - b_{ш1})(1 - \varkappa_\delta) =$$

$$= (20{,}5 - 5{,}6)(1 - 0{,}6) = 5{,}96;$$

по (13-128)

$$\Delta\lambda_{1н} = C_1 \left[\frac{h_{ш1}}{b_{ш1}(C_1 + b_{ш1})} + \right.$$

$$\left. + \frac{h_3}{(b_{п1} + b_{ш1})(C_1 + b_{ш1} + b_{п1})} \right] =$$

$$= 5{,}96 \left[\frac{1}{5{,}6\,(5{,}96 + 5{,}6)} + \right.$$

$$\left. + \frac{2{,}5}{(10{,}1 + 5{,}6)(5{,}96 + 5{,}6 + 10{,}1)} \right] =$$

$$= 0{,}135;$$

$$\lambda_{п1н} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{1н} =$$

$$= 1{,}5 - 0{,}135 = 1{,}365;$$

$$\lambda_{д1н} = \lambda_{д1} \varkappa_\delta = 1{,}25 \cdot 0{,}6 = 0{,}75;$$

$$\Sigma\lambda_{1н} = \lambda_{п1н} + \lambda_{д1н} + \lambda_{л1} =$$

$$= 1{,}365 + 0{,}75 + 0{,}98 = 3{,}095;$$

$$x_{1н} = x_1 \frac{\Sigma\lambda_{1н}}{\Sigma\lambda_1} = 0{,}14 \cdot \frac{3{,}095}{3{,}73} = 0{,}116 \ ом.$$

18. *Индуктивное сопротивление рассеяния ротора* при $s=1$

$$x_{2\xi н}' = x_{к\xi н} - x_{1н} = 0{,}222 - 0{,}116 =$$

$$= 0{,}106 \ ом;$$

$$x_{2\xi н} = x_{2\xi н}' \frac{Z_2}{12 w_1^2 k_{о1}^2} = 0{,}106 \cdot \frac{1}{201} =$$

$$= 52{,}7 \cdot 10^{-5} \ ом.$$

19. *Коэффициенты магнитной проводимости рассеяния ротора* при $s=1$ в соответствии с (7-52)

$$\Sigma\lambda_{2\xi н} = \frac{x_{2\xi н} \cdot 10^8}{7{,}9 f_1 l_\delta''} = \frac{52{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot 10^8}{7{,}9 \cdot 50 \cdot 35{,}5} =$$

$$= 3{,}76;$$

по (7-49)

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_к}{Z_2 \, l''_\delta \, \Delta^2} \lg \frac{4,7D_к}{2(a+b)} =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 42,8}{82 \cdot 35,5 \cdot 0,229^2} \lg \frac{4,7 \cdot 42,8}{2(1,5+4,0)} = 0,82;$$

по (7-41)

$$\lambda_{д2} = 0,9 \frac{t_2 (q_2 k_{o2})^2 \rho_{д2} k_{ш2}}{\delta k_\delta} \sigma_{д2} = 0,9 \times$$

$$\times \frac{1,79 (4,56 \cdot 1)^2 \cdot 1 \cdot 1}{0,1 \cdot 1,19} \cdot 0,443 \cdot 10^{-2} = 1,25$$

$$\left(q_2 = \frac{Z_2}{3 \cdot 2p} = \frac{82}{3 \cdot 6} = 4,56; \; \sigma_{д2} = \right.$$

$$\left. = 0,443 \cdot 10^{-2} \text{ по табл. 7-2в} \right);$$

$$\lambda_{д2н} = \lambda_{д2} \varkappa_\delta = 1,25 \cdot 0,6 = 0,75;$$

$$\lambda_{п2\xi н} = \Sigma \lambda_{2\xi н} - \lambda_{л2} - \lambda_{д2н} =$$

$$= 3,76 - 0,82 - 0,75 = 2,19;$$

по (13-134)

$$C_2 = (t_2 - b_{ш2})(1 - \varkappa_\delta) =$$

$$= (17,9 - 1,5)(1 - 0,6) = 6,57;$$

по (13-135)

$$\Delta\lambda_{2н} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \frac{C_2}{C_2 + b_{ш2}} = \frac{h_{ш2}}{1,5} \frac{6,57}{6,57 + 1,5} =$$

$$= 0,542 h_{ш2};$$

по (13-137)

$$\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2\xi н} + \Delta\lambda_{2н} = 2,19 + 0,542 h_{ш2};$$

по (7-34)

$$\lambda_{п2\xi} = \frac{h_x}{3b_{п2}} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} = \frac{16,7}{3 \cdot 3,2} +$$

$$+ \frac{h_{ш2}}{1,5} = 1,75 + 0,667 h_{ш2}$$

[при высоте стержня $h = a > 22$ *мм* для учета вытеснения тока в (7-34) вместо h_1 подставляется $h_x = 16,7$ *мм* (см. 13-7, в, п. 1);

$$b_{п2} \approx \frac{b}{0,9} = \frac{2,9}{0,9} \approx 3,2 \text{ мм} \Bigg].$$

20. *Размеры паза ротора.* Из двух последних уравнений $2,19 + 0,542\, h_{ш2} = 1,75 + 0,667\, h_{ш2}$ находим высоту усика зубца ротора $h_{ш2} = 3,5$ *мм*. Возьмем $h_{ш2} = 3$ *мм* (при этом несколько возрастают $I_{нач}$ и $M_{нач}$).

На рис. 13-60 показан паз ротора с найденными размерами:

$$b_{ш2} = 1,5 \text{ мм}; \; b_{п2} = 3,2 \text{ мм}; \; h_{z2} = 39 \text{ мм}.$$

21. *Поверочный расчет.* При полученных размерах паза и зубца ротора уменьшилось магнитное напряжение зубцов ротора, что, однако, не вызвало заметного изменения намагничивающего тока; значение x'_2 увеличилось до 0,22 *ом* (x'^{*}_2 до 0,155), что привело к снижению $\cos\varphi$ до 0,876 и $M_м/M_н$ до 2,05 (без учета насыщения от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях ротора); к. п. д. несколько увеличился вследствие уменьшения $P_{э2}$.

Расчет пусковых характеристик мог бы быть выполнен так же, как это указано в § 13-10, А при расчете небольшого короткозамкнутого двигателя.

При расчете серии машин, когда достаточно получить приближенные значения $m_{нач}$ и $i_{нач}$, удовлетворяющие требованиям ГОСТ или ВТУ, размеры паза ротора приходится определять путем подбора и ряда расчетов, считаясь с установленными нормалями для пазов, проводниковой меди и пр. В этом случае предложенный здесь метод расчета может служить для предварительной ориентировки.

Рис. 13-60.

б) Ротор с двойной клеткой

Статор двигателя, для которого заданы $m_{нач} = 1,7$ и $i_{нач} = 5$, возьмем такой же, как в примере расчета двигателя с контактными кольцами (§ 13-10, Б).

Приведем здесь только основные результаты расчета, делая ссылки на соответствующие формулы § 13-7, в, п. 2. При этом укажем, в какой последовательности можно рассчитать двойную клетку, т. е. определить размеры ее стержней, короткозамыкающих колец и паза ротора. Будем использовать данные, полученные в предыдущих примерах расчета. Выбираем форму паза по рис. 13-19, *в*.

Определение размеров клеток и паза ротора. 1. Принимаем $\cos\varphi_н \approx 0,87$ и $\eta \approx 0,938$; при этом получим:

$$P_{1н} = 266 \text{ квт}; \; I_{1н} = 268 \text{ а}.$$

2. Общие потери двигателя

$$\Sigma P = P_{1н}(1 - \eta_н) = 16,5 \text{ квт}.$$

3. Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{э2} = \Sigma P - P_{э1} - P''_0 - P_{доб} =$$

$$= 16,5 - 5,46 - 5,182 - 1,33 = 4,53 \text{ квт}.$$

4. Ток ротора по (13-96) $I'_{20н} = 241$ *а*.

5. Активные сопротивления: по (13-95) $r'^{e}_{2э(s\approx0)} = 0,0261$ *ом*; по (13-97) $r'^{e}_{э(s\approx0)} = 0,0261$ *ом* (при раздельных кольцах $r'_0 = 0$); при $s = 1$ по (13-100)

$$r'_{2э} = 0,0261 \cdot 1,7 \left(\frac{1}{5}\right)^2 \frac{1}{0,0177} = 0,1 \text{ ом},$$

где по (13-101) $s_н \approx 0,0177$; по (13-103) $r_к = r_1 + r'_{2э} = 0,0253 + 0,1 = 0,1253$ *ом*.

6. Полное и индуктивные сопротивления: по (13-104)

$$z_{к.н} = \frac{380}{5 \cdot 268} = 0,284 \text{ ом};$$

по (13-105) $x_{к.н} = 0,25$ *ом*;
по (13-106) $x''_{э.н} = x_{к.н} - x_{1н} - x''_{0н} = 0,255 - -0,116 - 0,063 = 0,076$ *ом*
см. пп. 17 и 19 § 13-10, В, п. а; по (13-76) с учетом насыщения

$$x'_{0н} \approx B_x\left[\frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}\left(1 - \frac{C_2}{C_2 + b_{ш2}}\right) + + 0,7 + \lambda_{д2н} + \lambda'_л\right] = 0,028\left[\frac{1}{1,5}\left(1 - - \frac{6,57}{6,57 + 1,5}\right) + 0,7 + 0,75 + 0,8\right] = = 0,063 \text{ ом},$$

где по (7-56)

$$B_x = 0,948 \cdot \frac{50}{82}\left(\frac{40 \cdot 0,926}{100}\right)^2 \frac{35,5}{100} = = 0,028 \text{ ом};$$

$h_{ш2} = 1$ *мм*; $b_{ш2} = 1,5$ *мм*; значения $\varkappa_\delta$ и C_2 оставляем неизменными}.

7. Параметры, токи и размеры клеток; размеры паза:

$$k_r = \frac{r'_э}{r_{э(s \approx 0)}} = \frac{0,1}{0,0261} = 3,84;$$

по (13-107)

$$s'' = \frac{0,0261\,(3,84 - 1)}{0,076} = 0,98;$$

по (13-108)

$$k_x = \frac{1}{1 + (0,98)^2} = 0,51;$$

по (13-109)

$$\alpha = \frac{3,84 - 1}{1 - 0,51} = 5,8;$$

по (13-109а) и (13-109б)

$$r'_в = (1 + 5,8)\,0,0261 = 0,177 \text{ ом}; \quad r'_н = = \frac{1 + 5,8}{5,8} \cdot 0,0261 = 0,0305 \text{ ом};$$

по (13-111)

$$\frac{h_2}{b_2} \approx \frac{0,076\left(\frac{1 + 5,8}{5,8}\right)^2}{0,028 \cdot 0,51} - 2,1 = 5,2$$

(выбираем $b_2 = 1,6$ *мм*; $h_2 = 8,3$ *мм*);

$$r_в = \frac{r'_в}{201} = 88 \cdot 10^{-5} \text{ ом}; \quad r_н = = \frac{1}{5,8} \cdot 88 \cdot 10^{-5} = 15,2 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$I_{20н} = I'_{20н}\frac{6w_1k_{01}}{Z_2} = 241 \cdot \frac{6 \cdot 40 \cdot 0,926}{82} = = 655 \text{ а};$$

$$I_в = 655 \cdot \frac{1}{1 + 5,8} = 96,5 \text{ а}; \quad I_н = 558,5 \text{ а};$$

токи колец

$$I_{к.в} = \frac{I_в}{\Delta} = \frac{96,5}{0,229} = 420 \text{ а}; \quad I_{к.н} = = \frac{I_н}{\Delta} = \frac{558,5}{0,229} = 2\,440 \text{ а};$$

сечения колец (медных)

$$s_{к.в} = \frac{I_{к.в}}{\Delta_{к.в}} = \frac{420}{2,62} = 160 \text{ мм}^2;$$

$$s_{к.н} = \frac{2\,440}{4,88} = 500 \text{ мм}^2;$$

активные сопротивления

$$r_{к.в} = \frac{1}{46} \cdot \frac{1,75 \cdot 10^{-2}}{160} = 0,237 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$r_{к.н} = \frac{1}{46} \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{500} = 0,0723 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$r_{с.в} = r_в - \frac{2r_{к.в}}{\Delta^2} = \left(88,0 - \frac{2 \cdot 0,237}{0,229^2}\right)10^{-5} = = 79 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

$$r_{с.н} = r_н - \frac{2r_{к.н}}{\Delta^2} = \left(15,2 - - \frac{2 \cdot 0,0723}{0,229^2}\right)10^{-5} = 12,44 \cdot 10^{-5} \text{ ом};$$

сечения стержней и их диаметры

$$s_{с.в} = \frac{I_в}{\Delta_с} = \frac{96,5}{1,7} = 56,7 \text{ мм}^2; \quad d_{с.в} = 8,5 \text{ мм}$$

[выбрана латунь Л62 при $\rho = 1/13$ (см. табл. 7-2)];

$$s_{с.н} = \frac{558,5}{6,44} = 86,5 \text{ мм}^2; \quad d_{с.н} = = 10,5 \text{ мм (медь)};$$

длины стержней

$$l'_{2в} = \frac{r_{с.в}s_{с.в}}{\rho} \cdot 10^2 = 13 \cdot 79 \cdot 10^{-5} \times \times 56,7 \cdot 10^2 = 58 \text{ см};$$

$$l'_{2н} = 46 \cdot 12,44 \cdot 10^{-5} \cdot 86,5 \cdot 10^2 = 49,6 \text{ см}$$

(плотности тока выбраны таким образом, чтобы обеспечить повышенную теплоемкость пусковой клетки, получить удобные размеры $l'_{2в}$ и $l'_{2н}$ и диаметры стержней, кратные 0,5 *мм*, чему соответствует нормальный сортамент круглого цветного металла; можно было бы для дальнейшего повышения теплоемкости пусковой клетки увеличить $d_{с.в}$ до 9,5 *мм;* тогда при сохранении $l'_{2в} = 58$ *см* уменьшилось бы $r_{с.в}$ и в небольшой степени снизился бы $M_{нач}$); размеры колец

$$(a \cdot b)_в = 16 \cdot 10 \text{ мм}^2; \quad (a \cdot b)_н = 30 \cdot 16,5 \text{ мм}^2;$$

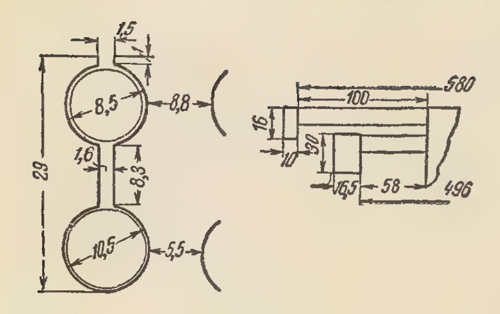


Рис. 13-61.

(на рис. 13-61 показаны паз, вылеты и кольца клеток ротора).

Поверочный расчет. Параметры двигателя для рабочего режима: $r_1=0{,}0253$ *ом*; $x_1=0{,}14$ *ом*; $x_{12}\approx 4{,}9$ *ом* ($I_\mu \approx 73{,}4$ *а*); $r_2'= = r_{э(s\approx 0)} = 0{,}0261$ *ом* (оставляем те же значения $r_н'$ и α, которые получены при расчете, так как найденные размеры практически остаются без изменений); по (13-81в)

$$x_н' = B_x\left(0{,}785 - \frac{b_2}{2b_н} + 0{,}785 - \right.$$

$$\left. - \frac{b_2}{2b} + \frac{h_2}{b_2} + \lambda_{л.н}\right) = 0{,}028\left(0{,}785 - \right.$$

$$- \frac{1{,}6}{2\cdot 10{,}7} + 0{,}785 - \frac{1{,}6}{2\cdot 8{,}7} + \frac{8{,}3}{1{,}6} +$$

$$\left. + 0{,}81\right) = 0{,}207 \text{ ом};$$

$$x_0' = B_x\left(\lambda_{п23} + \lambda_{д2} + \lambda_л'\right) =$$

$$= 0{,}028\,(1{,}366 + 1{,}25 + 1{,}09) = 0{,}1 \text{ ом},$$

где $\lambda_{п23}$ по (13-78), $\lambda_{л.н}$ и $\lambda_л' = \lambda_{л.в}$ по (7-49); по (13-92)

$$x_2' = x_{2э(s\approx 0)} = x_н'\left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 +$$

$$+ x_0' = 0{,}207\left(\frac{5{,}8}{1+5{,}8}\right)^2 + 0{,}1 = 0{,}25 \text{ ом}.$$

По приведенным данным расчета (потери в стали и механические приняты такими же, как для двигателя в примере расчета § 13-10, Б) была построена круговая диаграмма и из нее определены номинальные величины и кратность максимального момента:

$$I_{1н} = 268\ а;\quad \cos\varphi_н \approx 0{,}872;\quad \eta \approx 0{,}938;$$

$$s_н \approx 1{,}77\%;\quad M_м/M_н \approx 1{,}91.$$

Пусковые характеристики двигателя могут быть определены так же, как показано в § 10-10, А; при этом для расчета параметров двойной клетки, соответствующих различным скольжениям, следует пользоваться кривыми рис. 13-24 и 13-25.

в) Ротор с клинообразными пазами

При поставленных условиях сопротивление пазовой части стержня ротора с клинообразными пазами должно увеличиться в $r_{с.п\xi}/r_{с.п}=3{,}16$ раза, так же как для ротора с глубокими пазами (§ 13-10,В, п. а). В этом случае размеры клинообразных стержня и паза (рис. 13-28) могут быть определены следующим образом.

Выбираем $\beta=b_1/b_2=0{,}35$; затем по рис. 13-30 для $k_r=3{,}16$ и $\beta=0{,}35$ находим $\xi=2{,}6$, чему соответствует $h=a=29$ *мм*. Согласно (13-118) имеем $b_2 = \dfrac{2s_c}{h(1+\beta)}$, что при $s_c= =101{,}5$ *мм*², $\beta=0{,}35$ и $h=29$ *мм* дает $b_2= = \dfrac{2\cdot 101{,}5}{29\,(1+0{,}35)} = 5{,}2$ *мм*; $b_1=0{,}35\cdot 5{,}2= =1{,}82$ *мм*. Размеры паза: в нижней части $b_н=5{,}4$ *мм*; в верхней части $b_{ш2}=2{,}02$ *мм*; размер h_4 должен быть установлен, так же как размер $h_{ш2}$ при глубоких пазах, в соответствии с надлежащим значением $\lambda_{п2\xi н}$.

Выбор размеров стержня и паза «бутылочного профиля» для заданных $m_{нач}$ и $i_{нач}$ может быть сделан на основе ряда повторных расчетов, после определения сечения стержня s_c по допустимой плотности тока $\Delta_c=6 \div 6{,}5$ *а/мм*². Это сечение s_c надо разделить на две части — прямоугольную и круглую — таким образом, чтобы получились значения k_r и k_x (как при двойной клетке), приближенно соответствующие заданным $m_{нач}$ и $i_{нач}$.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МАШИН

14-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В данной главе рассматривается расчет трехфазных синхронных машин — явнополюсных и неявнополюсных. При этом имеются в виду машины с неподвижным якорем и вращающимися полюсами.

Расчет небольших машин с вращающимся якорем, выполняемых по типу машин постоянного тока, в основном не отличается от расчета явнополюсных машин с неподвижным якорем. Такие машины на мощности, обычно не превышающие 4—5 *квт*, изготовлялись заводами в небольшом количестве при использовании штампов для листов якоря и полюсов, деталей и конструктивных

узлов нормальных серийных машин постоянного тока.

В настоящее время на электромашиностроительных заводах организовано серийное производство нормальных явнополюсных синхронных машин. Они составляют единые серии для заводов Советского Союза и предназначаются для общего применения как генераторы и двигатели.

В качестве приводного (первичного) двигателя для синхронных генераторов могут служить: двигатели внутреннего сгорания (например, дизели), паровые, гидравлические или газовые турбины, электродвигатели.

Синхронные двигатели могут применяться для насосов, вентиляторов, компрессоров, генераторов (двигатель-генераторы), различных мельниц и других механизмов.

Серии явнополюсных синхронных машин мощностью примерно от 75 до 800 *квт*, отнесенной к 1 000 *об/мин*, иногда проектируются таким образом, чтобы для них можно было использовать статоры асинхронных машин соответствующих мощностей (габариты 10—13; см. приложение I, табл. I-2). При бо̀льших мощностях приходится переходить к статорам, собранным из сегментов (габариты 14—20). В этом случае проектируется серия синхронных машин, статоры которых используются и для асинхронных машин.

Основное исполнение машин от 75 до 800 *квт* (при 1 000 *об/мин*) по способу защиты и вентиляции — защищенное с самовентиляцией (обычно для 10-го и 11-го габаритов при 1 500, 1 000, 750 *об/мин* — аксиальная вытяжная; для 12-го и 13-го габаритов — радиальная); по способу монтажа — горизонтальное на двух щитовых подшипниках (обычно подшипники качения для 10-го и 11-го габаритов без капсюлей, для 12-го и 13-го габаритов с капсюлями).

Предусматриваются также модификации:

а) двигатели с вертикальным валом и фланцем на щите;

б) генераторы и двигатели на двух щитовых и одном стояковом подшипниках (со шкивом между щитовым и стояковым подшипниками); на двух стояковых подшипниках и фундаментной плите и др.

Синхронные машины на щитовых подшипниках выполняются с чугунными станинами (корпусами статора) и щитами. Машины на стояковых подшипниках имеют сварные корпуса.

Для синхронных машин с чугунными корпусами обычно применяется возбудитель в виде отдельной машины постоянного тока с параллельным или со смешанным возбуждением, установленной на корпусе синхронной машины и сочлененной с ней клиноременной передачей.

Для синхронных машин со сварными корпусами (14—20-й габариты) при скоростях вращения 1 000, 750 и 600 *об/мин* применяется соединение возбудителя с валом синхронной машины эластичной муфтой. При скоростях вращения 500—214 *об/мин* предусматривается соединение возбудителя с валом машины через клиноременную передачу. При меньших скоростях вращения для возбуждения обычно используются отдельно установленные возбудительные агрегаты.

Машинные возбудители для нормальных синхронных машин, как правило, представляют собой одну из модификаций основного исполнения серии машин постоянного тока.

В последние годы в системах возбуждения синхронных машин находят все более широкое применение полупроводниковые и ионные выпрямители. При помощи выпрямителей и трансформаторов последовательного включения производится «подпитка» обмотки возбуждения возбудителя или питание его отдельной обмотки возбуждения. При этом осуществляется компаундирование синхронной машины [ср. с машиной постоянного тока смешанного (компаундного) возбуждения]. Выпрямители позволяют также более совершенным образом осуществить автоматическое регулирование напряжения генераторов или $\cos\varphi$ двигателей и, кроме того, повысить их устойчивость в работе.

Наряду с указанными нормальными синхронными машинами в Советском Союзе выпускаются также небольшие явнополюсные генераторы мощностью от 5 до 75 *квт* (5—9-й габариты) на напряжения 400 и 230 *в*, 1 500 *об/мин*, 50 *гц*, имеющие вытяжную аксиальную вентиляцию. Они составляют отдельную серию машин и предназначаются для стационарных и передвижных установок общего применения. Возбуждение здесь осуществляется при помощи полупроводниковых выпрямителей, специальной аппаратуры и приборов, позволяющих получить автоматическое регулирование напряжения.

Как отмечалось, явнополюсные машины в настоящее время в ряде случаев выполняются с массивными полюсами или массивными полюсными наконечниками, при которых не требуется отдельная успокоительная (или пусковая) обмотка, так как такие полюсные наконечники вместе с медными кольцами, плотно прикрепленными к их торцам, вполне ее заменяют.

Гидротурбинные генераторы (гидрогенераторы) и паротурбинные генераторы (турбогенераторы) используются как основные источники энергии трехфазного переменного тока на гидравлических и тепловых электростанциях.

Гидрогенераторы с горизонтальным и вертикальным валом мощностью до нескольких тысяч киловатт при скорости вращения не ниже 100 *об/мин* могут изготовляться на основе упомянутой серии машин 14—20-го габаритов. Существуют и отдельные серии таких гидрогенераторов.

Крупные гидрогенераторы на десятки и сотни тысяч киловатт представляют собой машины индивидуального исполнения. Наиболее мощные гидрогенераторы построены в Советском Союзе для Красноярской ГЭС — на 500 *Мвт* и 93,8 *об/мин*.

Потребность в турбогенераторах для тепловых электростанций с каждым годом возрастает. Мощность их колеблется от 0,75 до 500 *Мвт*. Имеются проекты турбогенераторов на 800 и 1 000 *Мвт*. В последние годы наиболее часто выпускаются турбогенераторы на мощности от 100 *Мвт* и выше.

Синхронные компенсаторы в настоящее время также требуются все в большем количестве. Они строятся на мощности от 5 до 100 *Мвар*.

Следует также упомянуть неявнополюсные синхронные двигатели на 3 000 *об/мин*, изготовляемые с массивным ротором по типу турбогенераторов. Они получили название синхронных турбодвигателей (СТД).

В задании на проект синхронной машины указываются следующие номинальные величины:

1) мощность $P_н$ [для генератора — обычно полная (кажущаяся) мощность на зажимах (*ква* или *Мва*), но также и активная мощность (*квт* или *Мвт*); для двигателя — механическая мощность на валу (*квт*); для синхронного компенсатора — реактивная мощность на его зажимах (*ква* или *Мва*), причем его номинальной мощностью считается реактивная мощность при опережающем токе];

2) линейное напряжение $U_{л.н}$, *в* или *кв*;

3) $\cos\varphi_н$ (обычно для работы машины с перевозбуждением: для генератора при отстающем токе, для двигателя при опережающем токе);

4) число фаз $m=3$;

5) сопряжение фаз (обычно звезда, так как при треугольнике ток в обмотке статора, наведенный третьей гармоникой поля поперечной реакции якоря, понижает использование машины);

6) частота тока f, *гц*;

7) скорость вращения n, *об/мин*.

В проектном задании могут быть также указаны специальные условия, в которых должна работать синхронная машина.

Для генератора, приводимого во вращение поршневым двигателем, может быть задано значение махового момента GD^2, превышающее обычное значение GD^2 нормальных синхронных машин. То же может требоваться и для синхронного двигателя, который должен приводить во вращение, например, поршневой компрессор.

Для гидрогенераторов также бывает заданным маховой момент GD^2. Кроме того, задается угонная скорость вращения $n_у$ гидрогенератора. Значения GD^2 и $n_у$ задаются заводом-поставщиком гидравлической турбины и зависят от типа турбины.

Согласно ГОСТ 5616-63 гидрогенератор должен в течение 2 *мин* без вредных деформаций выдерживать повышенную скорость вращения, равную 1,75 номинальной. Указанная скорость вращения не должна быть менее скорости вращения, достигаемой гидроагрегатом при полном сбросе нагрузки и при исправной системе регулирования плюс 15% номинальной скорости вращения.

При полной угонной скорости вращения (для поворотнолопастных турбин при сохранении комбинаторной связи) напряжения в роторе не должны превосходить предела текучести и деформация обода ротора должна быть не более размера воздушного зазора.

Угонные скорости вращения нормальных серийных синхронных машин, а также турбогенераторов принимаются равными 1,2 $n_н$.

14-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Как указывалось в гл. 1, для определения главных размеров D и l_δ необходимо правильно выбрать значения индукции в воздушном зазоре $B_{\delta н}$ и линейной нагрузки A.

Значения $B_{\delta н}$ и A при номинальной нагрузке для трехфазных явнополюсных машин в зависимости от полюсного деления τ приведены на рис. 14-1. Они примерно соответствуют современным машинам 14—20-го габаритов на напряжение 6 000—6 300 *в* при изоляции обмотки статора класса В. Синхронные двигатели при $P_н \geqslant 1\,250$ *квт* (в габаритах 15—19) изготавливаются также на 10 000 *в*. Значения $B_{\delta н}$ и A для них должны быть снижены примерно на 5—8%.

Для машин 10—13-го габаритов при выборе $B_{\delta н}$ и A можно обратиться к тем же кривым рис. 14-1.

Значения $B_{\delta н}$ и A для небольших машин (5—9-го габарита) можно брать из кривых рис. 14-2.

Для **гидрогенераторов** при $D_a \leqslant 425$ *см* и $n \geqslant 100$ *об/мин* значения $B_{\delta н}$ и A можно брать из рис. 14-1. Для более мощных гидрогенераторов с косвенным (поверхностным)

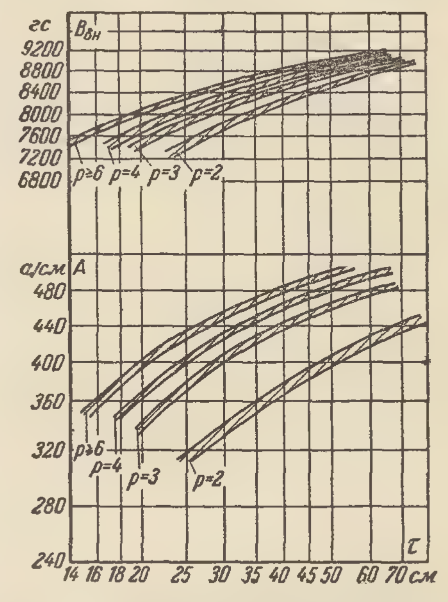


Рис. 14-1. Значения индукции в воздушном зазоре $B_{\delta н}$ (при номинальной нагрузке) и линейной нагрузке A для явнополюсных синхронных машин в зависимости от полюсного деления τ.

воздушным охлаждением при $D_a > 425$ *см* значения $B_{\delta н}$ и A рекомендуется брать из рис. 14-3. При этом рекомендуемые отношения A/B_δ для соответствующего τ дают значения переходного индуктивного сопротивления по продольной оси $x'_d \approx 0,25 \div 0,35$ (в относительных единицах), что обычно удовлетворяет требованиям в отношении динамической устойчивости гидрогенераторов, работающих на длинные линии электропередачи.

Для гидрогенераторов при $P_н > 200 \div 250$ *Мва*, а в ряде случаев и при несколько меньших мощностях целесообразно перейти к непосредственному (внутрипроводниковому) охлаждению обмоток статора и ротора. Для обмотки статора может быть использовано водяное охлаж-

дение, а для обмотки ротора — форсированное воздушное охлаждение. Разработаны конструкции обмоток ротора, позволяющие и для них осуществить водяное охлаждение. Для

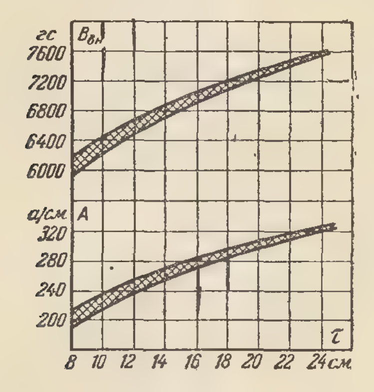


Рис. 14-2. Значения $B_{\delta н}$ и A для небольших явнополюсных синхронных машин (5—9 габариты) в зависимости от τ при $2p=4$.

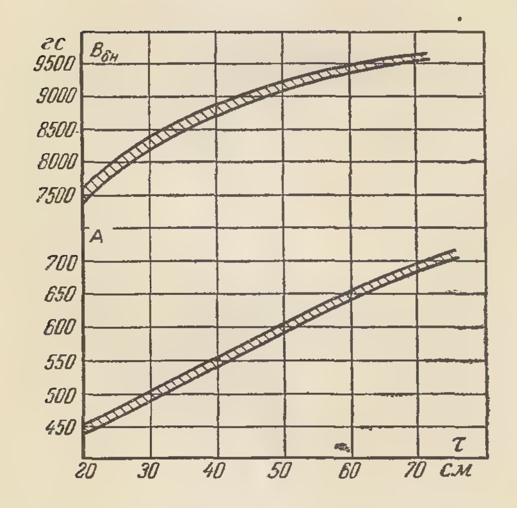


Рис. 14-3. Значения $B_{\delta н}$ и A для мощных гидрогенераторов с косвенным (поверхностным) воздушным охлаждением при $D_a >$ >425 *см*.

указанных машин можно значительно повысить линейную нагрузку A — до 1 200—1 400 *а/см*, тогда как индукция в воздушном зазоре $B_{\delta н}$ может быть повышена только до 11 000—11 500 *гс*, так как дальнейшее повышение $B_{\delta н}$ привело бы или к недопустимому насыщению зубцов статора, или к уменьшению ширины его пазов. При этом x'_d достигает значений, равных 0,40—0,50 (в относительных единицах), что считается допустимым при современных системах возбуждения машин и способах его автоматического регулирования.

Турбогенераторы на заводах Советского Союза в настоящее время выполняются двухполюсными на 50 *гц*, следовательно, на 3 000 *об/мин*. В последующем рассматриваются только такие турбогенераторы, причем рекомендации по выбору размеров, способов охлаждения и электромагнитных нагрузок для них приводятся на основе данных машин, выпускаемых заводом «Электросила» имени С. М. Кирова.

Для турбогенераторов при $P_н \approx$ $\approx 0{,}75 \div 50$ (60) *Мвт* обычно применяется косвенное воздушное охлаждение (обозначение Т2); при $P_н \approx$ $\approx 50 \div 100$ (150) *Мвт* — косвенное водородное охлаждение (обозначение ТВ); при $P_н \approx 100 \div 200$ *Мвт* — косвенное водородное охлаждение статора и непосредственное водородное (форсированное) охлаждение обмотки ротора (обозначение ТВФ); при $P_н \approx 150 \div 500$ *Мвт* — непосредственное водяное охлаждение обмотки статора и непосредственное водородное охлаждение обмотки ротора (обозначение ТВВ). Существуют также турбогенераторы с непосредственным водородным охлаждением обмоток статора и ротора. Разработаны в основном проекты турбогенераторов с полным водяным охлаждением обмоток статора и ротора при $P_н=500$ *Мвт* и выше, до 1 000 *Мвт*.

Мы ограничимся рассмотрением вопросов проектирования турбогенераторов типов Т2, ТВ, ТВФ и ТВВ, имея в виду сообщить только основные сведения, которые позволяют уяснить принципы проектирования современных турбогенераторов.

В табл. 14-1 указываются номинальные мощности турбогенераторов $P_н$, *Мвт* и соответствующие им внутренние диаметры статора D, *см*, линейные нагрузки A, *а/см* и максимальные индукции в зазоре $B_{\delta н}$, *гс* при номинальной нагрузке.

Таблица 14-1

$P_н$	0,5—1,5	2—4	6	12	25—30	50—100	150—200	300 (500)
D	47—52	60—62	70—72	77—80	87—90	96—108	110—120	130—135
A	420—440	450—470	480—500	510—530	560—580	610—620 (730—760)	1 000—1 500 (1 380—1 450)	1 500(1750)
$B_{\delta н}$	6 600—7 200	7 500—7 800	8 100—8 300	8 400—8 500	8 600—8 650	8 700—8 850	8 900—9 000	9 250—9 300 (9500)

Примечание. При $P_н$=0,5 ÷ 30 *Мвт* значения A относятся к типам Т2.

При $P_н$ = 50 ÷ 100 *Мвт* значения A без скобок относятся также к типам Т2; значения A в скобках — к типам ТВ при давлении водорода внутри машины 0,05—0,5 *ат* (здесь и далее указывается избыточное давление); при давлении водорода 1,5—2 *ат* они могут быть повышены на 15—20%.

При $P_н$ = 150 ÷ 200 *Мвт* значения A без скобок относятся к типам ТВФ при давлении водорода 2 *ат*; значения в скобках — к типам ТВВ при давлении водорода 3—3,5 *ат*.

При $P_н$=300(500) *Мвт* значения A относятся к типам ТВВ (давление водорода до 4 *ат*).

Индукции в стальных участках магнитной цепи явнополюсных машин можно выбирать, руководствуясь табл. 14-2.

Таблица 14-2

Значения индукции в стальных участках магнитной цепи явнополюсных машин

Участки магнитной цепи	Значения индукции, *гс*
Ярмо статора	11 800—15 700
Зубцы статора в наиболее узком месте	15 500—19 500
Зубцы статора при полузакрытых трапецеидальных пазах	14 000—16 000
Полюсы	14 000—16 000
Ярмо ротора из литой или листовой стали	10 000—13 000
Ярмо ротора из чугуна	5 500—6 500

Значения индукции, приведенные в табл. 14-2, так же как и значения $B_{\delta н}$ на рис. 14-1 и 14-2, относятся к машинам, работающим с номинальной нагрузкой при перевозбуждении с $\cos \varphi_н = 0{,}8$ и имеющим индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора $x_\sigma^* \approx 0{,}08 \div 0{,}15$. Следовательно, при холостом ходе и номинальном напряжении они будут примерно на 6—8% меньше.

Индукции в стальных участках магнитной цепи обычно возрастают вместе с мощностью машины.

Для крупных гидрогенераторов индукции можно выбирать по той же табл. 14-2 (ближе к высшим значениям). Если для статора гидрогенератора применяется холоднокатаная листовая сталь (обычно при $P_н \geqslant 150$ *Мвт*), то наибольшее расчетное значение индукции в зубцах может быть повышено до 20 500 *гс*, тогда как индукция в ярме статора при номинальной нагрузке не должна быть больше 16 000 *гс*. При применении холоднокатаной стали сегменты, из которых собираются пакеты статора многополюсных гидрогенераторов, штампуются из листов таким образом, чтобы магнитные линии в зубцах были направлены вдоль прокатки листов.

Для турбогенераторов, работающих с номинальной нагрузкой и $\cos \varphi_н = 0{,}8$, индукция в ярме статора при горячекатаной стали выбирается в пределах 14 000—16 000 *гс*, при холоднокатаной стали — в пределах 16 000—17 500 *гс*. При холоднокатаной стали сегменты пакетов статора турбогенератора штампуются таким образом, чтобы магнитные линии в ярме статора были направлены вдоль прокатки листов.

Указанные значения B_c в ярме статора возрастают с мощностью машины. При водородном и непосредственном охлаждении обмотки статора их можно брать ближе к высшим пределам, но не следует переходить за эти пределы, так как при больших значениях B_c поток ярма будет интенсивно вытесняться в конструктивные части статора, что приведет к большим потерям в них.

Наибольшая индукция в зубцах статора (в коронке зубца) $B_{z1м}$ при номинальной нагрузке турбогенератора выбирается в пределах 16 200—20 500 *гс*. Здесь при водородном и непосредственном охлаждении обмотки статора можно брать $B_{z1м}$ ближе к высшим значениям.

Расчетная индукция $B_{z0,2}$ в сечении малого зубца ротора на расстоянии 0,2 высоты паза от его дна составляет при номинальной нагрузке 19 000—22 000 *гс* и возрастает обыч-

но с диаметром ротора. Ее значение используется при определении размеров паза и зубца ротора и соответствует принятой методике расчета магнитной цепи турбогенератора (см. § 14-7).

Индукция в ярме ротора $B_р$ при номинальной нагрузке турбогенератора получается в пределах 15 000—18 000 *гс* (иногда для сохранения надлежащего значения $B_р$ в центральное отверстие бочки ротора забивается стальной стержень).

Указания по выбору плотности тока для обмоток статора и ротора (возбуждения) даются в § 14-4 и 14-9.

14-3. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ)

а) **Нормальные явнополюсные машины.** Главные размеры D и l_δ нормальных явнополюсных синхронных машин могут быть определены так же, как и асинхронных машин. Внутренний диаметр статора D можно предварительно взять по рис. 13-7 или 13-8 в зависимости от расчетной мощности P'. Последняя рассчитывается следующим образом (см. § 1-1).

Для генератора

$$P' = \frac{k_E P_н}{\cos\varphi_н}, \text{ ква}, \qquad (14\text{-}1)$$

где $P_н$ — номинальная мощность, *квт* (если $P_н$ — в *ква*, то $P' = k_E P_н$); коэффициент $k_E = E_r/U_н$ (см. рис. 6-22) зависит от заданного $\cos\varphi_н$ и для машин средней и большой мощности главным образом от индуктивного сопротивления рассеяния $x_\sigma^* \approx$ $\approx 0{,}08 \div 0{,}15$ отн. ед.:

$$k_E \approx \sqrt{\cos^2\varphi_н + (\sin\varphi_н + x_\sigma^*)^2}. \qquad (14\text{-}2)$$

При $\cos\varphi_н = 0{,}8$ (при отстающем токе) можно предварительно взять $k_E \approx 1{,}08$.

Для двигателя

$$P' = \frac{k_E P_н}{\eta_н \cos\varphi_н}, \text{ ква}; \qquad (14\text{-}3)$$

k_E при $\cos\varphi_н$, соответствующем работе двигателя с опережающим током, определяется, так же как и для генератора, по (14-2); при $\cos\varphi_н = 0{,}9$ $k_E \approx 1{,}05 \div 1{,}06$; значения к.п.д. $\eta_н$ можно взять из табл. 14-3 или табл. 14-4, где указаны также принятые шкалы мощностей нормальных серийных явнополюсных машин.

Таблицы для к.п.д. составлены по данным каталогов заводов Советского Союза. Табл. 14-3 относится к машинам 10—13-го габаритов, табл. 14-4 — к машинам 14—20-го габаритов. Приведенные в них значения к. п. д. следует рассматривать как ориентировочные.

Как отмечалось, синхронные двигатели, начиная с 1 250 *квт* ($\cos\varphi_н = 0{,}9$), выполняются также и на 10 000 *в*. В этом случае значения их к.п.д. снижаются: при $P_н = 1\,250 \div 2\,000$ *квт* — примерно на 1—0,6%, при $P_н = 2\,500 \div 6\,300$ *квт* — на 0,5—0,2%.

Таблица 14-3

Значения к. п. д. (%) синхронных двигателей при $\cos\varphi = 0{,}9$ на напряжения до 660 *в* и 6 000 *в* (указаны в скобках)

$P_н$, *квт*	*n, об/мин*					
	1 500	1 000	750	600	500	375
55	—	—	88,5	—	—	—
75	—	89,0	90,0	—	—	—
100	—	89,1	90,2	90,5	—	—
125	91,0	90,5	90,7	91,0	90,0	88,0
160	92,0	91,0	91,4	91,5	90,5	88,5
200	92,5	91,5	92,0	92,0	91,5	89,5
250	93,0	92,0	92,7	92,5	92,2	—
320	93,3	92,5	93,3	93,0	(92,0)	—
400	93,4	93,5	(92,5)	(92,5)	—	—
500	(93,5)	(93,0)	(93,2)	(93,2)	—	—
630	(94,5)	(94,0)	(94,3)	—	—	—
800	(94,6)	(94,3)	—	—	—	—
1 000	(95,0)	—	—	—	—	—

Значения к. п. д. (%) синхронных двигателей при $\cos\varphi_н = 0,9$ и синхронных генераторов

P, квт	n,					
	100	125	150	167	187	214
320	—	86,5/86,5	85,5/85,5	88,5	88,5/87,5	89,0/88,5
400	86,0/86,0	88,5/88,5	89,0/88,5	90,0	89,5/89,5	90,8/90,2
500	88,5/88,5	90,2/89,5	90,8/90,4	91,2	90,8/90,2	92,2/91,6
630	89,8/90,0	90,8/90,2	91,8/91,2	91,2	92,0/91,6	91,8/91,2
800	90,4	90,8/90,6	92,0/91,6	91,8	92,0/91,8	92,2/92,4
1 000	91,4	91,8/91,4	91,2/91,4	92,8	92,6/92,2	92,6/92,4
1 250	91,4	92,8/92,2	92,4/92,4	92,8	93,6/93,4	93,4/93,0
1 600	92,4	93,6	93,2/93,2	93,6	93,4/93,2	94,4/94,0
2 000	93,2	93,6	93,8	94,4	94,2/93,8	94,2/94,0
2 500	94,0	94,0	94,4	94,8	94,8/94,4	94,6/94,6
3 200	—	94,4	94,6	94,8	95,3	95,0/95,1
4 000	—	95,1	95,0	95,0	95,6	95,6
5 000	—	—	—	—	—	—
6 300	—	—	—	—	—	—
8 000	—	—	—	—	—	—
10 000	—	—	—	—	—	—

После предварительного определения D следует найти внешний диаметр статора D_a. При этом можно воспользоваться теми же соотношениями, которые даны для асинхронных машин (§ 13-3). Диаметр D_a должен быть равен одному из нормализованных диаметров, значения которых приведены в табл. I-2 (приложения I). По диаметру D_a, взятому из этой таблицы (если $D_a \leqslant 99$ *см*) нужно снова определить D, используя указанные соотношения.

Если $D_a > 99$ *см*, сердечник статора приходится собирать из сегментов. Размеры сегментов должны выбираться в соответствии с найденными предварительно диаметрами статора D_a и D таким образом, чтобы при штамповке сегментов из листов электротехнической стали стандартных размеров ее отходы были по возможности минимальными.

При D_a до 325 *см* (до 19-го габарита включительно) статор делается неразъемным. Диаметру $D_a = 325$ *см* соответствует диаметр по корпусу статора $D_{к.с} \approx 390$ *см*. При $D_a = 425$ *см* (20-й габарит) и соответственно при $D_{к.с} \approx 540$ *см* по условиям транспортировки (имеются в виду железнодорожные габариты) статор приходится делать разъемным на две части, что также следует учитывать при выборе размеров сегментов. Окончательные их размеры, как указано в дальнейшем, устанавливаются при выборе числа пазов статора и проектировании его обмотки.

После выбора D_a и D для нормальных машин следует определить полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \text{ см.} \qquad (14\text{-}4)$$

Теперь в соответствии с (1-7) можно предварительно определить длину статора l_δ по формуле

$$l_\delta = \frac{6{,}1 \cdot 10^{11} P'}{\alpha_\delta\, k_B\, k_{01}\, A B_{\delta н}\, D^2 n}, \text{ см.} \qquad (14\text{-}5)$$

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ зависит от $\alpha_p = b_p/\tau$, где b_p — действительная длина полюсной дуги, которую для машин при $2p \geqslant 6$ практически можно считать равной соответствующей хорде (рис. 14-4). Для машин, имеющих $2p = 4$, длина дуги заметно отличается от длины хорды b_p. Ее можно принять равной $2R_p \arcsin \frac{b_p}{2R_p}$.

Вначале выбирается коэффициент α_p. Его значение колеблется в пределах 0,55—0,75. Более высокие значения выбираются для больших многополюсных машин: $\alpha_p = 0{,}70 \div 0{,}75$.

Для малополюсных машин, а также для машин небольшой мощности и при равномерном воздуш-

Таблица 14-4

при $\cos\varphi_н = 0{,}8$ (указаны справа от черты) новых серий СДН и СГН на 6 000 и 6 300 *в*

об/мин

250	300	375	500	600	750	1 000
89,0/88,5	90,2/90,0	90,2/90,4	—	—	—	—
90,0/90,6	91,2/91,0	91,6/91,6	92,6/92,4	—	—	—
91,6/91,8	91,6/91,8	92,8/92,8	93,6/93,2	—	—	—
92,8/92,2	92,6/92,8	93,2/93,2	93,6/93,6	93,8/93,8	—	—
93,2/92,6	93,2/93,2	93,6/93,4	94,0/93,8	94,4/94,2	94,8/94,4	—
93,4/93,0	93,2/93,2	94,0/93,6	94,8/94,8	94,6/94,6	95,4/94,8	95,2/95,0
94,0/93,8	94,0/94,0	94,6/94,4	94,8/94,4	95,1/95,0	94,8/94,6	95,8/95,5
93,8/93,6	94,8/94,6	94,6/94,6	95,3/95,0	95,7/95,4	95,6/95,2	95,7
94,4/94,4	95,0/95,0	95,2/95,0	95,8/95,4	95,7/95,4	96,0	95,9
95,1/95,2	95,3/95,1	95,6/95,6	95,7/95,6	96,2/95,8	95,8	96,4
95,8/95,7	95,8/95,7	95,6/95,5	96,2/95,9	96,6/96,4	96,4	96,6
95,6	96,2	96,0	96,5	96,6	96,7	96,6
—	—	—	96,4	96,9	96,6	96,8
—	—	—	96,7	97,1	96,9	97,1
—	—	—	97,1	96,9	97,1	—
—	—	—	97,4	97,2	97,3	—

ном зазоре в пределах полюсной дуги $\alpha_p = 0{,}63 \div 0{,}70$, причем при $2p = 4$ иногда $\alpha_p < 0{,}6$. В настоящее время равномерный зазор для явнополюсных машин применяется сравнительно редко и только для небольших машин (примерно при $P_н \leqslant 50$ *квт*). Обычно $\delta_м/\delta = 1{,}5$ (см. § 6-1). Выбрав α_p, $\delta_м/\delta$ (предварительно при $\delta/\tau \approx 0{,}03$), по кривым рис. 6-8 или 6-7 находим α_δ и k_B.

Обмоточный коэффициент k_{o1} предварительно можно принять равным 0,92. Такое значение k_{o1} получается при двухслойных обмотках с шагом $y \approx 0{,}83\tau$, которые и следует выбирать для нормальных машин.

Значения A и $B_{\delta н}$ берутся по рис. 14-1 или 14-2 в зависимости от τ. В дальнейшем при проектировании обмотки и пазов статора и окончательном определении размеров D и l_δ приходится несколько отступить от взятых значений A и $B_{\delta н}$. Эти отступления, как указывалось, должны быть по возможности небольшими, так как при повышении A тепловая нагрузка обмотки статора может оказаться чрезмерной, а при уменьшении A снижается использование машины. При бо̀льших, чем по рис. 14-1 и 14-2, значениях $B_{\delta н}$ могут возникнуть затруднения при выборе размеров паза и зубцов статора.

Подставив указанные величины в (14-5), найдем расчетную длину статора l_δ.

Предварительно действительную длину статора l_1 (рис. 14-4) можно принять равной:

$$l_1 \approx (1{,}05 \div 1{,}09)\, l_\delta,\ см. \quad (14\text{-}6)$$

Длина всех пакетов статора

$$l = l_1 - n_в b_в,\ см \quad (14\text{-}7)$$

или при равных по ширине пакетах

$$l = (n_в + 1)\, l_{пак},\ см. \quad (14\text{-}8)$$

Число радиальных вентиляционных каналов $n_в$ при их ширине $b_в = 1$ *см* выбирается таким образом, чтобы ширина пакета лежала в пределах 4,5—5,5 *см*. Ширина крайних пакетов иногда выбирается на 0,5—1,0 *см* большей ширины внутренних пакетов.

Отсюда определяются l, l_1 и длина $l_\delta \approx l_1 - 0{,}5 n_в b_в$. Затем рассчитывается $\lambda = l_\delta/\tau$. После этого следует составить таблицу вариантов (табл. 14-5). Значение $\lambda = l_\delta/\tau$ обычно лежит в пределах, указанных на рис. 14-5, где заштрихованная область значений λ соответствует достаточно экономичным машинам с удовлетворительными характеристиками.

При расчете серии машин, когда необходимо при данных диаметрах D_a и D иметь еще одну машину (или две—четыре машины смежных ти-

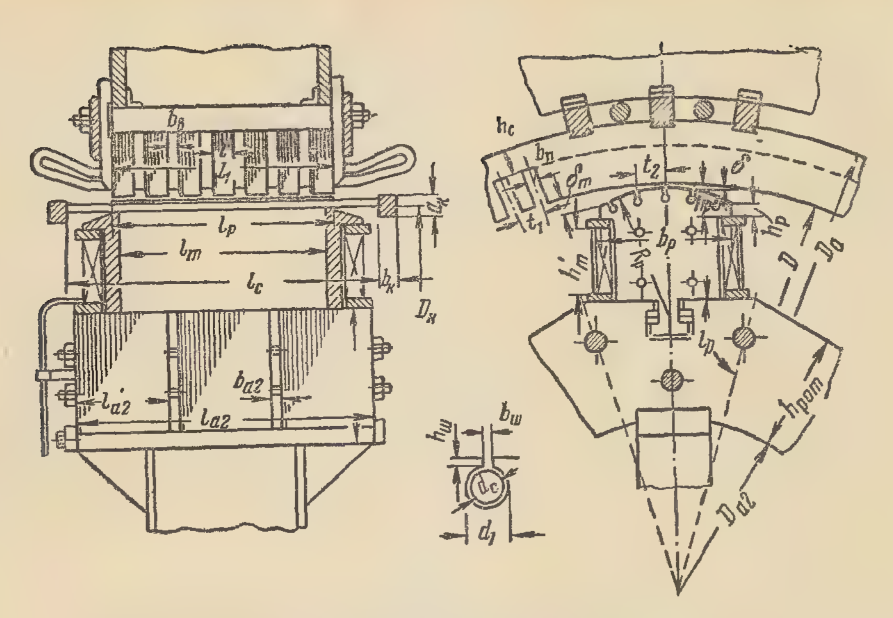


Рис. 14-4. Размеры активной стали статора, полюса и успокоительной (или пусковой) обмотки.

Таблица 14-5

Таблица вариантов

№ варианта	D_a	D	τ	A	$B_{\delta н}$	l_1	$n_в\, b_в$	l_δ	$\frac{l_\delta}{\tau}$	$\gamma l_\delta/\tau$ для смежных типов

пов) на мощность $\gamma P_н$ (или $\gamma' P_н$, $\gamma'' P_н$...), длина этой машины может быть принята равной γl_δ (или соответственно $\gamma' l_\delta$, $\gamma'' l_\delta$...). При $P_н >$ > 100 *ква* коэффициент нарастания мощности $\gamma \approx 1{,}25$ (см. табл. 14-3, 14-4).

В случае, если l_δ/τ и $\gamma l_\delta/\tau$ лежат вне указанных пределов, приходится изменить D_a и D и снова по (14-5) найти l_δ. Следовательно, здесь необходимо рассчитать несколько вариантов (табл. 14-5) и выбрать из них наилучший.

Круглые полюсы для нормальных серийных машин не применяются.

б) **Гидрогенераторы.** Выбор главных размеров для гидрогенераторов приходится производить, как отмечалось, с учетом необходимости получить заданный маховой момент GD^2 гидроагрегата, состоящего из турбины и генератора. По конструктивным особенностям турбины не-

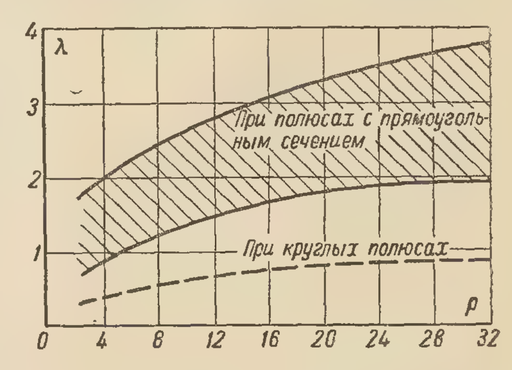


Рис. 14-5. Значения $\lambda = l_\delta/\tau$ в зависимости от числа пар полюсов.

возможно заложить большие маховые массы в ее колесо; поэтому принято повышать GD^2 агрегата за счет конструкции ротора гидрогенератора.

Можно было бы применить для повышения GD^2 специальный маховик, укрепленный на ободе ротора, что иногда делается для дизельных генераторов и гидрогенераторов относительно небольшой мощности (примерно до 2 000—2 500 *ква*). Для более мощных гидрогенераторов, однако, более целесообразным оказалось выполнение ротора с большим GD^2 за счет увеличения его диаметра.

Для гидрогенераторов мощностью приблизительно до 2 000—4 000 *ква* при открытых камерах и наличии автоматического регулятора скорости вращения можно ориентировочно принять

$$(GD^2)_{мин} = 800 \frac{P_н}{n_н^2}, \ T \cdot м^2, \quad (14\text{-}9)$$

где $(GD^2)_{мин}$ — минимальный допустимый маховой момент;

$P_н$ — номинальная мощность, *ква*;

$n_н$ — номинальная скорость вращения, *об/мин*.

Следовательно, выбор D и l_δ для гидрогенераторов указанной мощности должен производиться с учетом необходимости получить GD^2 не меньший, чем дает (14-9).

Для более мощных гидрогенераторов необходимый маховой момент можно найти из формулы для механической постоянной времени (см. § 11-8)

$$T_{мех} = \frac{27{,}4\, GD^2 \left(\frac{n_н}{100}\right)^2}{P_н}, \ сек, \quad (14\text{-}10)$$

где GD^2 — маховой момент, $T \cdot м^2$; $P_н$ — номинальная мощность, *ква* (при определении $T_{мех}$ для гидрогенераторов и турбогенераторов обычно $P_н$ — полная номинальная мощность). Значение $T_{мех}$ современных крупных гидрогенераторов колеблется в нешироких пределах (6,5—7,8 *сек*); только в редких случаях $T_{мех}$ возрастает до 9 или снижается до 5,5 *сек*.

Некоторые крупные гидрогенераторы, построенные в США и Советском Союзе 20—25 лет тому назад, имеют $T_{мех} \approx 14 \div 18$ *сек*; здесь главным образом имелось в виду повысить динамическую устойчивость машин. В настоящее время нет необходимости в таком чрезмерном повышении $T_{мех}$.

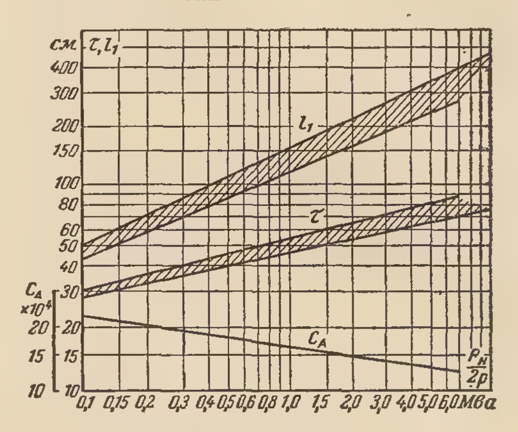


Рис. 14-6. Кривые зависимости C_A, l_1 и τ от $P_н/2p$ (полной мощности на один полюс).

Наряду с GD^2 или $T_{мех}$ бывает заданной также угонная скорость вращения $n_у$. В последние годы требования в отношении GD^2 и $n_у$ стали менее жесткими в связи с усовершенствованием аппаратуры регулирования гидравлических турбин и систем автоматического регулирования возбуждения гидрогенераторов. При поворотнолопастных турбинах обычно $n_у \approx [1{,}8 \div 2{,}2\ (2{,}4)]n_н$, при радиально-осевых $n_у \approx (1{,}75 \div 1{,}9) n_н$. Для очень мощных гидрогенераторов (на сотни мегавольтампер) по согласованным техническим условиям расчетная максимальная скорость вращения может быть снижена — при сопряжении с поворотнолопастной турбиной до 1,75 номинальной, а при сопряжении с радиально-осевой до 1,65 номинальной.

При выборе главных размеров гидрогенераторов можно руководствоваться кривыми, приведенными на рис. 14-6 [Л. 111]. Они получены по данным выполненных гидрогенераторов и могут служить для предварительного определения l_1 и τ, а следо-

вательно, и D; при этом верхней границе заштрихованной области значений τ соответствует нижняя граница области значений l_1, и наоборот. Здесь же указана примерная зависимость машинной постоянной C_A от $P_н/2p$.

При заданном GD^2 диаметр D определяется следующим образом.

Для современных гидрогенераторов можно применить эмпирическую формулу

$$GD^2 \approx kD^{3,5}\, l_1 \cdot 10^{-9}\ T \cdot м^2, \quad (14\text{-}11)$$

где $k=4,5 \div 5,5$ (в среднем $k=5$); D и l_1 — размеры, *см*.

Формула для машинной постоянной (§ 1-1)

$$C_A = \frac{D^2\, l_\delta\, n_н}{P'}, \quad (14\text{-}12)$$

где для крупных гидрогенераторов можно принять

$$P' \approx 1,1P_н,\ ква \text{ и } l_\delta \approx 0,95 l_1.$$

Решая совместно (14-11) и (14-12) с учетом указанных соотношений (при $k=5$), получаем:

$$D \approx 154 \sqrt[3]{\left[\frac{10GD^2}{P'}\ \frac{n_н}{C_A \cdot 10^{-4}}\right]^2},\ см; \quad (14\text{-}13)$$

здесь GD^2 — заданный маховой момент; C_A — можно взять из рис. 14-6. Обычно τ, соответствующее полученному диаметру D, лежит в пределах, указанных на рис. 14-6.

В дальнейшем при выборе сегментировки статора и размеров сегментов окончательно устанавливается диаметр D, который не должен заметно отличаться от найденного по (14-13).

При конструировании машины более точно определяется маховой момент GD^2, и если он получается меньше заданного, увеличивают вес ротора путем увеличения размеров его обода l_{a2} и $h_р$ (рис. 14-4).

Необходимо также при выборе диаметра D иметь в виду механические напряжения в ободе ротора и креплениях полюсов, возникающие при угонной скорости вращения $n_у$. Практически эти механические напряжения зависят от окружной скорости $v_у$ на диаметре D, соответствующей

$$n_у = k_у n_н,\ об/мин; \quad (14\text{-}14)$$

здесь $k_у$ — «коэффициент угона».

Окружная скорость

$$v_у = k_у v_н = k_у \frac{\pi D n_н}{60 \cdot 100},\ м/сек. \quad (14\text{-}15)$$

Так как при $f=50$ *гц*

$$v_{н(м/сек)} = \frac{\pi D n_н}{60 \cdot 100}\ \frac{2p}{2p} = \frac{2f\tau}{100} = \tau_{(см)},$$

то можно написать

$$v_{у(м/сек)} = k_у \tau_{(см)}. \quad (14\text{-}16)$$

Опыт показывает, что для гидрогенераторов не следует брать $v_у$ больше 120—130 *м/сек* при шихтованном ободе ротора, если для его сегментов применяется сталь Ст.3 (при применении для сегментов более прочных легированных сталей $v_у$ можно довести до 145 *м/сек*); при кованом или собранном из целых дисков роторе (при $D<5$ *м*) $v_у$ не следует брать больше 160—170 *м/сек*.

Предельные значения $v_у$ иногда приходится выбирать для мощных быстроходных гидрогенераторов ($n_н>250$ *об/мин*) или весьма мощных гидрогенераторов средней скорости вращения ($n_н=100 \div 250$ *об/мин*), так как для них по условиям перевозки статора по железной дороге необходимо ограничить его длину и, следовательно, выбирать наибольший допустимый по механической прочности ротора диаметр D.

в) **Турбогенераторы.** При выборе главных размеров турбогенератора следует обратиться к табл. 14-1 и из нее взять диаметр D в соответствии с заданными мощностью и системой охлаждения. Минимальный диаметр $D \approx 50$ *см* обусловлен необходимостью иметь достаточные размеры для укладки лобовых частей обмотки возбуждения при допустимых размерах концевых частей ротора. Максимальный диаметр $D \approx 135$ *см* определяется допустимым диаметром ротора $D' \approx 115$ *см*, которому соответствует при $2p=2$ и $f=50$ *гц* окружная скорость $v_н \approx$ ≈ 180 *м/сек* (при $n_н=3\,000$ *об/мин*) и $v_у=1,2\, v_н \approx 216$ *м/сек* (при угонной

скорости вращения $n_y = 3\,600$ *об/мин*). При этом диаметре ротора механические напряжения в материалах поковок ротора и (особенно) его кольцевых бандажей достигают предельных допустимых значений.

Для машин с воздушным охлаждением диаметры D должны примерно соответствовать указанным в табл. 14-1, так как при больших диаметрах может чрезмерно возрасти относительное значение потерь на трение воздуха о ротор и статор, пропорциональных D'^4, а при меньших диаметрах размеры пазов ротора могут оказаться недостаточными для укладки в них проводников обмотки возбуждения.

После выбора D и в соответствии с табл. 14-1 значений A и $B_{\delta н}$ определяется расчетная длина статора

$$l_\delta = \frac{8{,}6 \cdot 10^{11} P'}{k_{о1} A B_{\delta н} D^2 n_н}, \text{ см.} \quad (14\text{-}17)$$

Числовой коэффициент 8,6 получается при принятых значениях $\alpha_\delta = 2/\pi$ и $k_B = 1{,}11$ [ср. с (14-5)], что допустимо для турбогенераторов. Расчетная мощность P' *ква* определяется по (14-1), где k_E можно предварительно взять из табл. 14-6.

Таблица 14-6

$P_н$	1	12	30	50	100	150	300
$k_{E\,(0{,}8)}$	1,07	1,08	1,085	1,09	1,10	1,12—1,13	—
$k_{E\,(0{,}85)}$	—	—	1,07	1,08	1,085	1,1	1,12—1,15
$k_{E\,(0{,}9)}$	—	—	1,06	1,07	1,075	1,085	1,1—1,12

Примечание. Таблица 14-6 соответствует табл. 14-1. Коэффициент k_E зависит согласно (14-2) от x^*_σ и $\cos\varphi_н$ (последний указан в индексе k_E). Для современных турбогенераторов $x^*_\sigma = 0{,}1 \div 0{,}2$ (возрастает с $P_н$ и A).

Обмоточный коэффициент $k_{о1}$ можно предварительно принять равным 0,92, если выбирается стержневая обмотка (с «паяными» головками витков) при шаге $y \approx 0{,}83\tau$. Если же выбирается катушечная обмотка (с «гнутыми» головками витков), то

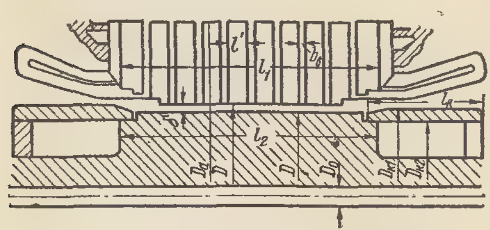


Рис. 14-7. Размеры активной стали статора, ротора и кольцевых бандажей турбогенератора.

следует, имея в виду укладку катушек в пазы статора двухполюсной машины, взять шаг $y \approx (0{,}5 \div 0{,}6)\tau$, чему соответствует $k_{о1} \approx 0{,}7$. Катушечная обмотка применяется, когда на паз приходится шесть и более эффективных проводников, обычно при $P_н < 6$ *Мва* и $U_{н.л} \geqslant 3\,150$ *в*.

По длине статор делится на пакеты обычно одинаковой длины $l' = 3{,}8 \div 4$ *см* (рис. 14-7); для машин с водяным охлаждением обмотки статора l' можно увеличить до 8 *см*.

В соответствии с l_δ и l' выбирается число радиальных каналов $n_в$ при ширине $b_в = 1$ *см* (при водяном охлаждении обмотки статора $b_в$ снижается до 0,5 *см*).

Полная длина статора

$$l_1 = \Sigma l' + n_в b_в = l + n_в b_в, \text{ см.} \quad (14\text{-}18)$$

Если длины пакетов одинаковы, то

$$l = \Sigma l' = (n_в + 1) l', \text{ см.} \quad (14\text{-}19)$$

Предварительно для турбогенератора можно принять

$$l_\delta \approx l_1 - (0{,}05 \div 0{,}1) n_в b_в, \text{ см.} \quad (14\text{-}20)$$

14-4. ОБМОТКА, ПАЗЫ И ЯРМО СТАТОРА. ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЫ (ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ)

а) **Нормальные явнополюсные машины.** В гл. 4 были даны указания, которыми следует руководствоваться при выборе обмотки статора

и ее изоляции для нормальных синхронных машин.

Здесь сообщаются дополнительные сведения, необходимые при проектировании обмотки и пазов статора.

Для нормальных машин 10—20-го габаритов применяется двухслойная петлевая обмотка при открытых пазах статора.

Число пазов на полюс зависит от полюсного деления и напряжения машины. Чем меньше полюсное деление и чем выше напряжение, тем меньше должно быть число пазов на полюс.

Для указанных машин пазовое деление t_1 (рис. 14-4) лежит обычно в пределах $2{,}1 \leqslant t_1 \leqslant 4{,}6$ *см*; при этом ширина паза $b_{п1} = (0{,}48 \div 0{,}43)\, t_1$ и в редких случаях $b_{п1} = 0{,}5 t_1$. Обычные значения ширины паза приведены в табл. 14-7.

Таблица 14-7

Значения ширины паза $b_{п1}$ (*см*)

τ, *см*	До 690 *в*	3 000—3 150 *в*	6 000—6 300 *в*
15	0,95—1,15	1,2—1,3	1,4—1,6
25	1—1,25	1,2—1,4	1,4—1,7
40	1,1—1,4	1,25—1,6	1,6—1,85
50	1,2—1,6	1,4—1,7	1,7—1,9
70	—	1,5—1,8	1,7—2,1

При $U_{н.л} = 10\,000$ *в* ширину паза не следует брать меньше 1,8 *см*.

Для нормальных машин при $2p \leqslant 12$ обычно выбирается целое число пазов на полюс и фазу: $q_1 = 2 \div 6$. При большем числе полюсов и относительно малом полюсном делении τ нередко выбирается q_1, равное дробному числу. В этом случае рекомендуется брать $q_1 > 1\frac{1}{2}$.

После выбора q_1 находим число пазов статора $Z_1 = 2pmq_1$ и пазовое деление $t_1 = \pi D / Z_1$.

Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_{п1} = \frac{t_1 A a_1}{I_н}, \qquad (14\text{-}21)$$

где $I_н$ — номинальный фазный ток;
a_1 — число параллельных ветвей фазы.

Как правило, $u_{п1}$ должно быть четным числом. При нечетном $u_{п1}$ требуются катушки двух типов с числами витков, отличающимися на единицу, что осложняет их изготовление.

Для получения $u_{п1}$, равным четному числу, можно изменить t_1 (изменить q_1), a_1 и только в небольшой степени A.

Число витков фазы статорной обмотки

$$w_1 = pq_1 u_{п1} \frac{1}{a_1}. \qquad (14\text{-}22)$$

При определении сечения проводника сначала выбирается плотность тока Δ_c, *а/мм²*. Для небольших машин (до 9-го габарита), выполняемых на напряжение не выше 690 *в*, применяется всыпная двухслойная петлевая обмотка (при $P_н < 10$ *квт* также и однослойная) из круглых проводников при полузакрытых пазах. Ее проектирование не отличается от проектирования такой же обмотки статора асинхронных машин (см. § 13-4).

Для нормальных машин 10—13-го габаритов при обычной ширине пакета статора 4,5—5,5 *см*

$$\Delta_c = 4 \div 5{,}7 \ а/мм^2.$$

Высшие значения относятся к коротким машинам на напряжения до 690 *в* при $\tau > 30 \div 35$ *см*. Низшие значения следует брать для длинных машин и при напряжении 6 000—6 300 *в*.

При выборе Δ_c для машин 14—20-го габаритов на напряжение 6 000—6 300 *в* можно также исходить из допустимого значения $A\Delta_c$, определяющего удельную тепловую нагрузку якоря от электрических потерь в его обмотке и температурный перепад в пазовой изоляции. Значение $A\Delta_c$ зависит от τ. Приближенно эту зависимость можно выразить формулой

$$A\Delta_c \approx k_\Delta \tau + 1\,000, \qquad (14\text{-}23)$$

где $k_\Delta \approx 15 \div 15{,}3$.

Отсюда находим плотность тока

$$\Delta_c = \frac{A\Delta_c}{A}, \ а/мм^2, \qquad (14\text{-}24)$$

где A — из рис. 14-1.

Для указанных машин $\Delta_c \approx 4{,}3 \div 3{,}2$ *а/мм²* (меньшие значения для

многополюсных машин). Для синхронных двигателей на 10 000 *в* плотность тока Δ_c следует снизить на 4—5%.

Теперь можно определить сечение проводника:

$$s'_c = \frac{I_н}{a_1 n_{эл} \Delta_c}, мм^2. \quad (14\text{-}25)$$

По приложению IV подбираем стандартное сечение s_c, ближайшее к s'_c. Для рассматриваемых машин выбирается прямоугольный проводник с размерами $a \times b \approx s_c$, позволяющими уложить $n_{эл} u_{п1}$ проводников в паз при выбранных ширине паза $b_{п1}$ и толщинах витковой и пазовой изоляции (§ 4-6, г, д; приложение VII). По ширине паза обычно укладывается один или два элементарных проводника. Сечение s_c не следует брать по возможности больше 18 *мм*² при высоте проводника a, не превышающей 2,63 *мм*. Задача определения размеров проводника решается путем совместного выбора a_1, $n_{эл}$ и $u_{п1}$. Ширина паза $b_{п1}$ может быть несколько изменена, но при этом индукция в наиболее узком сечении зубца не должна превышать значений, указанных в табл. 14-2.

Глубина паза $h_{п1}$ и, следовательно, высота зубца определяются после укладки в паз проводников, изоляции и клина. Обычно $h_{п1} \approx (3{,}8 \div 5{,}5)\, b_{п1}$.

После определения $h_{п1}$ следует определить высоту ярма статора

$$h_c = \frac{1}{2}(D_a - D) - h_{п1}, см \quad (14\text{-}26)$$

и проверить индукцию в ярме статора B_c (табл. 14-2).

Индукция B_c определяется по формуле

$$B_c = \frac{\Phi_н}{2 h_c l k_c}, гс, \quad (14\text{-}27)$$

где при номинальном фазном напряжении $U_н$

$$\Phi_н = \frac{k_E U_н \cdot 10^8}{4 k_в f k_{o1} w_1}, мкс. \quad (14\text{-}28)$$

Для машин 10—13-го габаритов применяется электротехническая сталь марки Э21 или Э31, для машин 14—20-го габаритов — обычно марки Э31.

Для неразъемного сегментированного статора (машины 14—19-го габаритов) обычно выбирается целое число C сегментов в одном слое. Каждый сегмент должен иметь целое число пазов $z_c = Z_1/C$, так как радиальные линии в местах стыков сегментов должны проходить через середины пазов. Между сегментами

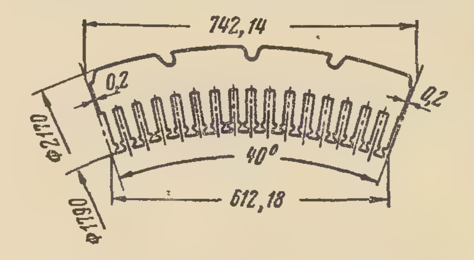


Рис. 14-8. Сегмент машины 17-го габарита ($Z_1=144$; $C=9$; $z_c=16$; $H_c=742{,}14$ *мм*).

одного слоя необходимо предусмотреть промежутки в 0,4—0,6 *мм*, чтобы избежать накладывания краев сегментов друг на друга.

Сегменты укладываются таким образом, чтобы стыки между ними в каждом последующем слое были смещены относительно стыков в предыдущем слое. Смещение одного слоя сегментов относительно соседнего составляет несколько пазовых делений. При z_c, равном четному числу, оно составляет обычно половину сегмента, при z_c, равном нечетному числу, — одну треть сегмента. В последнем случае z_c должно быть кратно трем.

Корпус статора рассматриваемых машин имеет продольные ребра, приваренные к крайним боковым стенкам. Одна из них делается с большим внутренним диаметром, чтобы можно было поместить нажимное кольцо. Сегменты укладываются с базированием по расточке указанных продольных ребер (диаметр расточки D_a). Направляющими для сегментов служат круглые шпильки с резьбовыми концами, при помощи которых производится также стягивание пакетов статора.

На внешней дуге сегмента, соответствующей диаметру D_a, располагаются полукруглые пазы симметрично относительно линии, проходящей через середину сегмента. Два из

них делаются скошенными (рис. 14-8). Такие сегменты легко надеваются на шпильки в любом месте, если их слегка согнуть. На внутренней дуге сегмента, соответствующей диаметру D, должны быть расположены пазы для обмотки.

Для того чтобы при штамповке сегментов отходы листовой стали

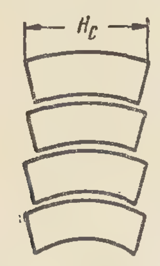


Рис. 14-9. Раскрой листа стали на сегменты.

были минимальными, следует выбрать бо́льшую хорду сегмента (рис. 14-9)

$$H_c = D_a \sin\left(180^\circ \frac{z_c}{Z_1}\right),\ см, \quad (14\text{-}29)$$

возможно более близкую к ширине или половине ширины листа электротехнической стали стандартных размеров (см. табл. 2-3). Для уменьшения количества сегментов и трудоемкости их сборки не рекомендуется брать $H_c < 37$ *см*.

При данных D_a и Z_1 не всегда можно подобрать целое число сегментов в одном слое C при целом числе пазов на сегмент z_c, чтобы получился экономичный раскрой листа стали. В этом случае можно взять C не равным целому числу. Например, на рис. 14-10 показан сегмент с 15 пазами; его дуга соответствует 50°; следовательно, здесь $C = 7\frac{1}{5}$. После укладки семи таких сегментов в одном слое восьмой сегмент 4/5 частью переходит в следующий слой и т. д.

C может быть также равно целому числу плюс $^1/_2$ или целому числу плюс $^1/_3$ при соответственном числе полукруглых пазов на сегмент для стяжных шпилек.

При определении размеров сегментов окончательно устанавливаются диаметр D, длина l_1 и размеры пазов, а также обмоточные данные статора.

Определение размеров сегментов при разъемном статоре рассматривается в последующем применительно к крупным гидрогенераторам.

б) **Гидрогенераторы.** Гидрогенераторы большой мощности примерно при $D > 280 \div 300$ *см* по условиям транспортировки приходится делать с разъемным статором. При $D < 400$ *см* число разъемов (число ча-

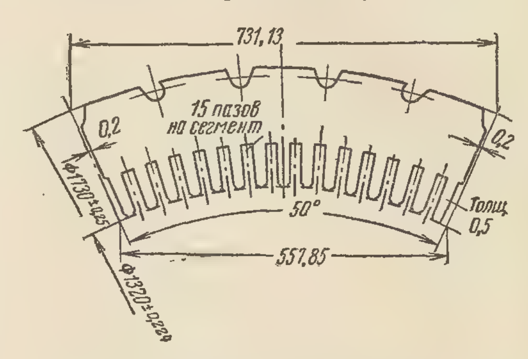


Рис. 14-10. Сегмент машины 16-го габарита $\left(Z_1 = 108;\ z_c = 15;\ C = 7\frac{1}{5}\right)$.

стей статора) выбирается равным двум, при 400 $см < D < 800$ *см* — четырем, при $D > 800$ *см* — шести и редко восьми. Число пазов разъемного статора Z_1 необходимо выбирать с учетом числа его частей.

Сегменты статора крупных гидрогенераторов обычно надеваются на выступы клиньев-ребер, имеющие форму ласточкина хвоста (рис. 14-4). Клинья-ребра при помощи угольников привариваются к «полкам» (внутренним стенкам) корпуса статора. Стяжка его пакетов производится с помощью шпилек, расположенных между клиньями-ребрами.

Наиболее часто последние размещаются равномерно вдоль внешней окружности сердечника статора [1].

Здесь также число пазов на сегмент z_c должно быть целым. Обычно на внешней дуге сегмента делаются два паза в форме ласточкина хвоста для надевания его на клинья-

[1] Возможна также другая расстановка клиньев-ребер, которая позволяет в ряде случаев получить более выгодные размеры сегментов [Л. 75, 111].

ребра. В зависимости от D_a выбирается $z_c=6\div13$ (для быстроходных гидрогенераторов при относительно небольшом D_a может быть $z_c=14$ и более).

Как отмечалось, стыки между сегментами одного слоя должны перекрываться сегментами следующего слоя. Принято величину перекроя брать равной половине сегмента, если z_c — четное число, и равной $(z_c\pm1)/2$ сегмента, если z_c — нечетное число. Для этого требуется, чтобы число пазов в каждой части статора Z_1/S (S — число разъемов) делилось без остатка на $z_c/2$.

При разъемном статоре необходимо иметь основные сегменты с z_c пазами и дополнительные сегменты, которые укладываются у стыков частей статора. Дополнительные сегменты обычно получаются путем разрезания основных сегментов на две части.

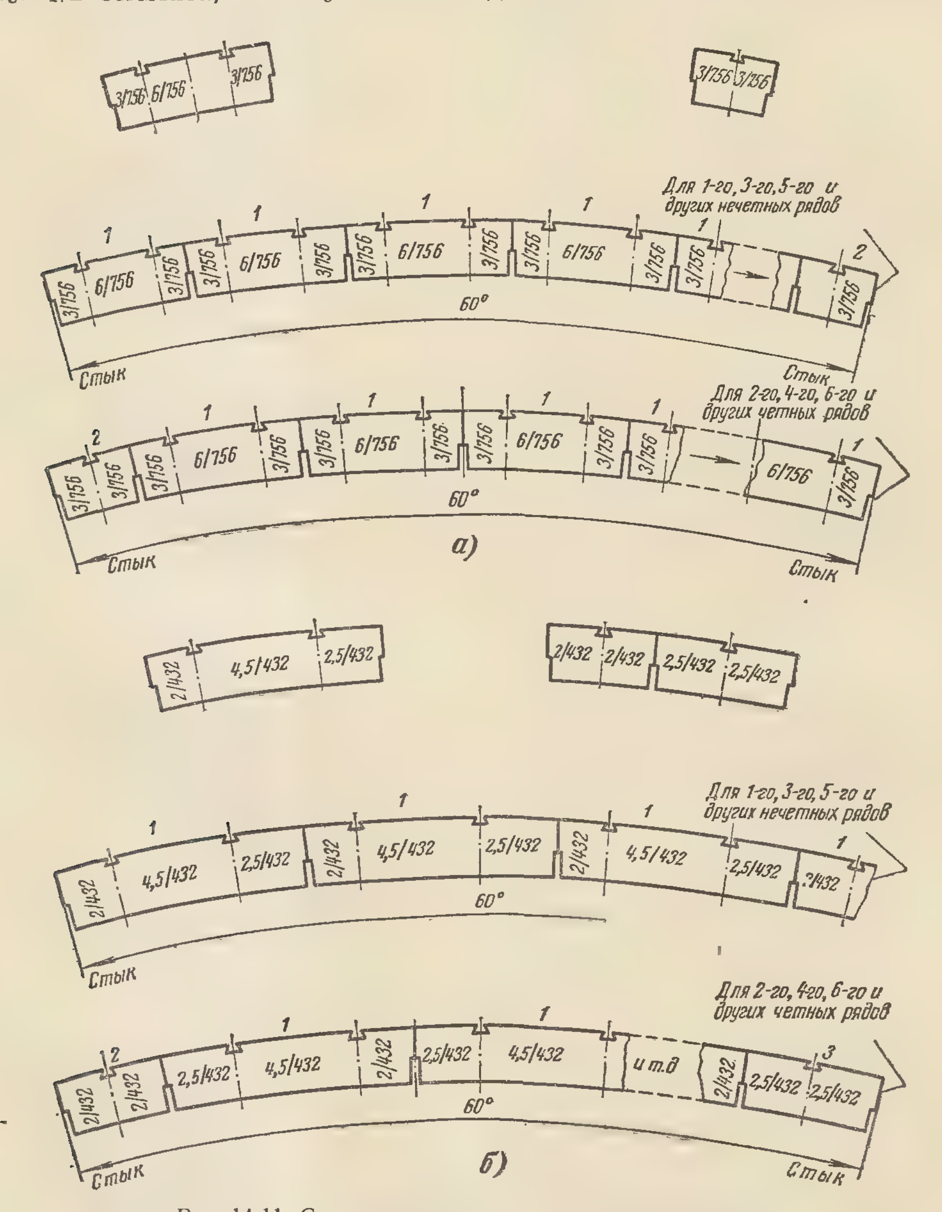


Рис. 14-11. Сегменты сердечника статора и их укладка.

а — z_c — четное число пазов в основном сегменте: *1* — основной сегмент; *2* — дополнительный сегмент; *б* — z_c — нечетное число пазов в основном сегменте; *1* — основной сегмент; *2* и *3* — дополнительные сегменты.

На рис. 14-11 как пример показаны основные сегменты с z_c, равным четному числу, и z_c, равным нечетному числу, соответствующие им дополнительные сегменты и укладка их в нечетных и четных рядах (слоях) в пределах одной части статора, имеющего $S=6$.

Указанные условия сегментировки сердечника статора необходимо учитывать при окончательном определении числа пазов Z_1, которое в основном зависит от размеров статора и данных примененной для него обмотки.

Для гидрогенераторов применяются катушечные и стержневые обмотки. Первые выполняются как двухслойные петлевые, вторые обычно как двухслойные (при водяном охлаждении — как однослойные) волновые. Катушечные петлевые обмотки имеют в пазу больше двух эффективных проводников: $u_{п1}>2$ ($u_{п1}$ должно быть четным числом). При стержневых волновых обмотках $u_{п1}=2$ (или $u_{п1}=1$).

Выбор обмотки статора для гидрогенератора в большой степени определяется его мощностью и напряжением. Современные гидрогенераторы в зависимости от их номинальной мощности обычно выполняются на следующие напряжения: при $P_н$ до 10—15 *Мва* (иногда до 20 *Мва*) — 6,3 *кв*; при $P_н$ до 50—70 *Мва* — 10,5 *кв*; при $P_н$ до 175 *Мва* — 13,8 *кв*; при $P_н>175$ *Мва* — 15,75 *кв* и выше.

В настоящее время для крупных многополюсных гидрогенераторов, как правило, применяется стержневая волновая обмотка. Она оказалась более выгодной и надежной, чем катушечная петлевая обмотка.

При волновой обмотке общая длина соединений между частями ее фаз значительно меньше общей длины междугрупповых соединений, которые требуются при петлевой обмотке.

При двух эффективных проводниках в пазу витковая изоляция получается более надежной, так как ее толщина в этом случае в 2 раза больше толщины корпусной изоляции.

Кроме того, при стержневой обмотке ее эффективные проводники выполняются из большого числа элементарных проводников, особым образом сплетенных между собой, что приводит к заметному снижению потерь от циркуляционных токов в обмотке.

Поэтому прежде всего следует проверить возможность применения стержневой волновой обмотки. Для этого вначале найдем максимальное возможное число пазов статора

$$Z_{1м}=\frac{2p\tau}{t_{1мин}}, \qquad (14\text{-}30)$$

где τ — предварительно выбранное полюсное деление;

$t_{1мин}$ — минимальное пазовое деление, меньше которого брать не рекомендуется. Оно в зависимости от напряжения указывается в табл. 14-8.

Таблица 14-8

$U_{н.л}$, *кв*	6,3	10,5	13,8	15,75
$t_{1мин}$, *см*	3,1	4,2	4,7	5,2

Затем найдем число пазов статора по формуле

$$Z_1=\frac{\pi DA}{\left(\frac{I_н}{a_1}\right)u_{п1}}. \qquad (14\text{-}31)$$

Если Z_1 при $a_1=1$ и $u_{п1}=2$ получается больше $Z_{1м}$, то стержневую волновую обмотку применять не следует; необходимо перейти к катушечной петлевой обмотке при $u_{п1}>2$, для которой Z_1 также не должно быть больше $Z_{1м}$.

Указанные в табл. 14-8 минимальные значения $t_{1мин}$ соответствуют минимальным значениям ширины паза $b_{п1\,мин}$, причем, как правило, $b_{п1\,мин}$ не должно быть больше $0{,}5\ t_{1\,мин}$. В выполненных машинах обычно $t_1\approx(1{,}1\div1{,}35)\ t_{1\,мин}$.

Стержневую волновую обмотку для крупных гидрогенераторов целесообразно применять при $I_н/a_1=1\,100\div2\,500$ *а*. Катушечная петлевая обмотка применяется, если $I_н/a_1$ не больше примерно 216 (324) *а*, чему соответствуют четыре (шесть) элементарных проводников в одном эффективном. Обычно число элементарных проводников в одном эффективном редко бывает больше четырех.

Руководствуясь приведенными указаниями и выбрав a_1 и $u_{п1}$ (при стержневой волновой обмотке $u_{п1}=2$), предварительно найдем по (14-31) число пазов Z_1 и затем $q_1=Z_1/2pm$. Если $q_1<3$, то следует выбрать дробную обмотку, при этом $q_1=b+\frac{c}{d}$ должно удовлетворять условиям симметрии: $2p/da_1$ равно целому числу, $d/3$ не равно целому числу. Кроме того, число пазов Z_1 должно разлагаться на возможно большее количество простых множителей (2, 3, 5...). Множители 17, 19, 23... нежелательны, так как осложняют сегментировку и условия разъема статора.

Если применяется стержневая волновая обмотка, то следует также дробную часть c/d числа q_1 подобрать по возможности так, чтобы были минимальными количество и общая длина соединений (перемычек) между частями фаз.

Дробь c/d для волновой обмотки может быть выбрана на основе приведенных в последующем соотношений.

Результирующий шаг волновой обмотки $y_р$ должен быть возможно ближе к двойному полюсному делению $2\tau=\frac{Z_1}{p}=2mq_1=6b+\frac{6c}{d}$, т. е.

$$y_р=6b+\frac{6c+g}{d}, \qquad (14\text{-}32)$$

где g — наименьшее целое число (положительное или отрицательное), при котором

$$\frac{6c+g}{d}=\text{целое число}. \qquad (14\text{-}33)$$

Если $g=\pm 1$, то каждая фаза будет иметь $2p/d$ неподразделенных повторяющихся частей с равнофазными э. д. с.; здесь понадобятся перемычки только для последовательного, последовательно-параллельного или параллельного соединения этих частей.

Если $|g|>1$, то каждая повторяющаяся часть фазы в свою очередь будет состоять из g частей с неравнофазными э. д. с., которые можно соединить только последовательно, на что потребуются добавочные перемычки, причем их количество и общая длина будут тем больше, чем больше $|g|$. Поэтому рекомендуется выбрать q_1 так, чтобы $\frac{6c+g}{d}$ равнялось целому числу при g, равном ± 1 или ± 2.

При выбранном числе q_1 число пазов Z_1 должно быть возможно ближе к Z_1 по (14-31). Кроме того, как отмечалось, оно должно удовлетворять условиям сегментировки сердечника статора при данном числе его разъемов; размеры сегмента следует выбрать с учетом необходимости получить рациональный раскрой стандартного листа стали, чтобы его бóльшая хорда $H_с=D_а\sin\left(180°\frac{z_с}{Z_1}\right)$ была приблизительно равна ширине или половине ширины листа (с припуском на штамповку 0,5—1 *см*).

Для крупных гидрогенераторов обычно применяется сталь марок Э41, Э42 или Э43, а при $P_н\geqslant 150$ *Мва* — также марки Э330.

В первом приближении можно принять

$$D_a\approx D+\tau,\ см. \qquad (14\text{-}34)$$

Рекомендуется составить таблицу вариантов значений q_1, Z_1, $z_с$, $H_с$; при этом можно несколько изменить $D_а$ и D. Из таблицы вариантов выбирается наилучший. В дальнейшем после определения размеров паза уточняются значения $D_а$ и D.

Приведенные соотношения (14-32) и (14-33) получаются на основе рассмотрения звезды пазовых э. д. с. обмотки. Они также позволяют составить ее схему [Л. 44].

Результирующий шаг волновой обмотки равен сумме частичных шагов

$$y_р=y_1+y_2, \qquad (14\text{-}35)$$

где y_1 — первый (задний) шаг, определяющий ширину витка;

y_2 — второй (передний) шаг со стороны выводов обмотки.

Для улучшения электромагнитных свойств обмотки один из шагов (y_1 или y_2) выбирается равным или приблизительно равным $\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\cdot 3q_1$. Укорочение шага при

волновой обмотке не дает экономии меди и изоляционных материалов, что мы имеем при катушечной петлевой обмотке.

Вылеты лобовых частей волновой обмотки будут короче с той стороны статора, которая соответствует укороченному шагу. Поэтому для вертикальных машин обычно выбирается $y_2 \approx \frac{5}{6} 3q_1$, чтобы иметь больше места для размещения выводов и перемычек обмотки в верхней части статора.

Теперь рассмотрим, как определяются размеры проводников обмотки статора и размеры его паза. Сначала обратимся к катушечной петлевой обмотке.

Ранее было указано, как для нее выбираются a_1, $u_{п1}$ и число элементарных проводников $n_{эл}$ с сечением $s_с \leqslant 18$ *мм²*.

Для определения $s_с$ надо задаться плотностью тока $\Delta_с$ *а/мм²*. Для крупных гидрогенераторов

$$\Delta_с = 2{,}5 \div 3{,}5\ а/мм^2. \quad (14\text{-}36)$$

Значение $\Delta_с$ выбирается тем больше, чем ниже $U_{н.л}$ и чем больше τ; при напряжении $U_{н.л} \leqslant 3\,150$ *в* можно $\Delta_с$ повысить до 3,8—4 *а/мм²*. Низшие значения $\Delta_с$ (3,1—2,5 *а/мм²*) выбираются при $U_{н.л} \geqslant 10\,500$ *в*.

Предварительно находим:

$$s'_с = \frac{I_н}{a_1 n_{эл} \Delta_с}, мм^2. \quad (14\text{-}37)$$

Из таблиц приложения IV подбираем ближайшее сечение $s_с$ с размерами $a \times b$ и $a_{из} \times b_{из}$ (применяется провод марки ПСД и в редких случаях при $U_{н.л} \leqslant 6\,300$ *в* — марки ПБД). Размеры $a_{из} \times b_{из}$ должны быть выбраны так, чтобы по ширине паза $b_{п1} \approx (0{,}43 \div 0{,}48)\,t_1$ можно было уложить один или два проводника; при этом надо учесть изоляцию паза. Двустороннюю толщину изоляции по ширине паза, которую обозначим через $2\delta_{и1}$, можно взять из табл. 14-9 или 14-10 (см. также рис. 14-12 и 14-13) в зависимости от $U_{н.л}$.

Из равенства

$$k_ш b_{из} = b_{п1} - 2\delta_{и1}, \quad (14\text{-}38а)$$

где $k_ш$ — число проводников по ширине паза (один, два или в редких случаях три), находим $b_{из}$ и из табл. IV-2 берем ближайший размер b; при этом ширина паза $b_{п1}$ может быть несколько изменена. Таким образом устанавливаются размеры $a_{из}$, $b_{из}$ и $s_с$ ($a \leqslant 2{,}63$ *мм*). Следует проверить плотность тока:

$$\Delta_с = \frac{I_н}{a_1 n_{эл} s_с}, а/мм^2.$$

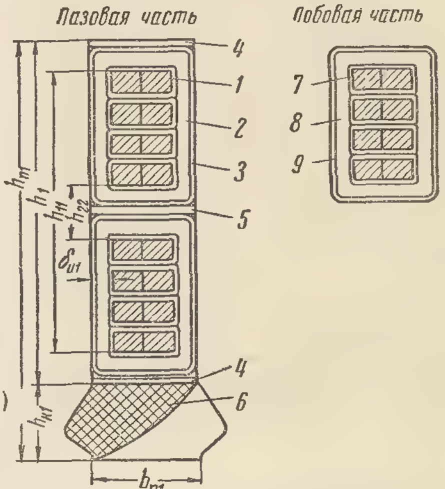


Рис. 14-12. Паз статора с проводниками и изоляцией и сечение лобовой части при катушечной обмотке (см. табл. 14-9).

Высота паза $h_{п1}$ определяется в соответствии с рис. 14-12 и табл. 14-9 или рис. 14-13 и табл. 14-10*:

$$h_{п1} = u_{п1} n_{эл} a_{из} \frac{1}{k_ш} + \delta_{и.в} + h_к, \quad (14\text{-}38б)$$

где $\delta_{и.в}$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза (табл. 14-9 или табл. 14-10);

* Таблицы 14-9 — 14-13, так же как рис. 14-12—14-15, 14-17 и 14-18, относятся к крупным гидрогенераторам и турбогенераторам. На этих рисунках показано сечение той части клина, где сделан косой срез; такие срезы делаются в частях клина, соответствующих его положению в радиальных вентиляционных каналах, для уменьшения «аэродинамического» сопротивления выхода газа (воздуха или водорода) из зазора в каналы или входа газа из каналов в зазор; направление среза выбирается в соответствии с направлением движения газа.

$h_к$ — высота клина, которая берется приблизительно равной $0{,}35b_{п1}$ (в крупных гидрогенераторах $h_к = 9$ *мм*).

Теперь можно определить высоту ярма статора h_c по (14-26) и затем найти индукцию B_c по (14-27). Значение B_c не должно выходить за пределы, указанные в табл. 14-2.

Обратимся к стержневой обмотке. Ее стержни состоят из большого количества элементарных проводников, переплетенных (транспонированных) друг с другом, как показано на рис. 14-14. На рис. 14-15 показан паз с двумя транспонированными стержнями. Здесь элементарные проводники на протяжении длины паза распределены примерно равными длинами во всех слоях стержня. При этом будут приблизительно равны э. д. с., наведенные в них пазовым полем рассеяния, и, следовательно, будут малы циркуляционные токи, возникающие вследствие различия указанных э. д. с.

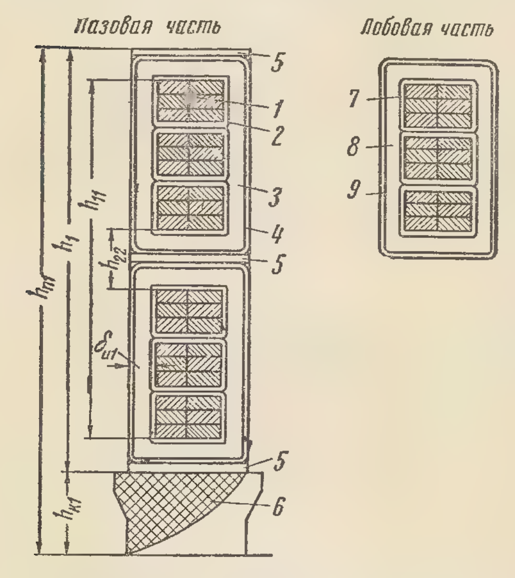


Рис. 14-13. Паз статора с проводниками и изоляцией и сечение лобовой части при катушечной обмотке (см. табл. 14-10).

При определении числа элементарных проводников $n_{эл}$ в стержне (эффективном проводнике), сечения элементарного проводника s_c и его размеров $a \times b$ можно исходить из формулы для сечения стержня

$$s_1 = (n_{эл} s_c) = \frac{I_н}{a_1 \Delta_c}, \text{ мм}^2, \quad (14\text{-}38в)$$

где плотность тока $\Delta_c = 2{,}5 \div 3{,}5$ *а/мм²* выбирается, так же как и при катушечной обмотке, в зависимости от $U_{н.л}$.

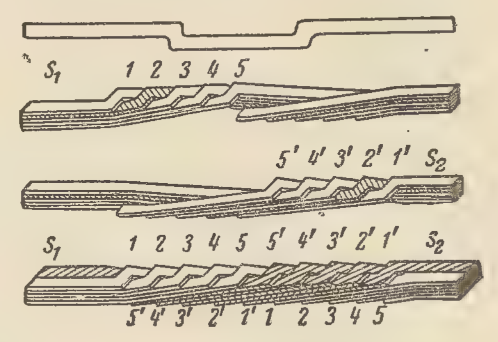


Рис. 14-14. Стадии изготовления транспонированного стержня.

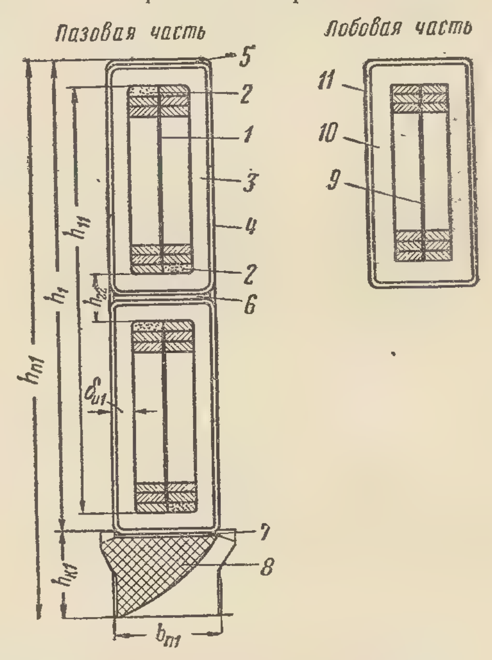


Рис. 14-15. Паз статора с проводниками и изоляцией стержневой обмотки и сечение лобовой части при $u_{п1} = 2$ (см. табл. 14-11).

Сначала найдем размер $b_{из}$ изолированного элементарного проводника (обычно применяется провод марки ПСД)

$$b_{из} = \frac{1}{k_ш}(b_{п1} - 2\delta_{и1}), \text{ мм}, \quad (14\text{-}39)$$

где $k_ш = 2$; $b_{п1}$ — предварительно выбранная ширина паза; $2\delta_{и1}$ — дву-

Таблица 14-9

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция двухслойных катушечных обмоток статора на напряжения от 500 до 6 300 *в*

Изоляция класса В. Провода марок ПСД, ПБД

Позиция на рис. 14-12	Наименование	Двусторонняя толщина изоляции, *мм*														
		по ширине при числе элементарных проводников в одном слое паза		по высоте при числе витков в катушке												
				один проводник в витке по высоте							два проводника в витке по высоте					
		1	2	6	7	8	9	10	11	12	5	6	7	8	9	10
	Пазовая часть															
	Витковая изоляция															
1	Микалента, один слой, вполуперекрой	0,75	0,75	4,5	5,25	6,0	6,75	7,5	8,25	9,0	3,75	4,5	5,25	6,0	6,75	7,5
	Разбухание изоляции	0,1	0,2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
	Корпусная изоляция															
2	Микалента для: 550 *в*	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
	3 150 *в*	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	6 300 *в*	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
3	*Хлопчатобумажная лента, один слой, впритык*	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	Электрокартон ЭВ промасленный (толщина 0,5 *мм*)	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	То же (толщина 2,5 *мм*)	—	—	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Зазор на укладку	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Всего на паз для: 500 *в*	4,7	4,8	21	23,7	24,4	26,1	27,8	29,5	31	20,3	21,4	23,3	25,2	27,1	29
	3 150 *в*	5,5	5,6	22,6	24,3	26,0	27,7	29,4	31,1	32,6	21,9	23,0	24,9	26,8	28,7	30,6
	6 300 *в*	6,9	7,0	27,4	26,0	30,8	32,5	34,2	35,9	37,5	26,7	27,8	29,7	31,6	33,5	35,4

Позиция на рис. 14-12	Наименование	Двусторонняя толщина изоляции, *мм*														
		по ширине при числе элементарных проводников в одном слое паза		по высоте при числе витков в катушке												
				один проводник в витке по высоте							два проводника в витке по высоте					
		1	2	6	7	8	9	10	11	12	5	6	7	8	9	10
	Лобовая часть															
	Витковая изоляция															
7	Микалента, один слой, вполуперекрой	0,75	0,75	4,5	5,25	6,0	6,75	7,5	8,25	9,0	3,75	4,5	5,25	6,0	6,75	7,5
	Разбухание изоляции	1,0	1,5	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
	Корпусная изоляция															
8	Микалента для: 550 *в*	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
	3 150 *в*	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
	6 300 *в*	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
9	Хлопчатобумажная лента, вполуперекрой	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Лакировка	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Всего на катушечную сторону для:															
	550 *в*	5,2	5,7	9,1	10,1	11,0	12,0	12,9	13,9	14,8	9,2	10,3	11,5	12,6	13,8	14,9
	3 150 *в*	6,0	6,5	9,9	10,9	11,8	12,8	13,7	14,7	15,6	10	11,1	12,3	13,4	14,6	15,7
	6 300 *в*	8,4	8,9	12,3	13,3	14,2	15,2	16,1	17,1	18,0	12,4	13,5	14,7	15,8	17,0	18,1

Примечание. Клин (поз. *6*) делается из промасленного дерева (бук), гетинакса, текстолита.

Таблица 14-10

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция двухслойных катушечных обмоток статора на напряжения 10 500, 13 800, 15 750 *в*
Изоляция класса В. Провода марок ПСД, ПДА

Позиция на рис. 14-13	Наименование	Толщина материала, *мм*	Двусторонняя толщина изоляции *мм*							
			по ширине при числе проводников в одном слое паза		по высоте при числе витков в катушке					
			2	3	2	3	4	5	6	7
	Пазовая часть									
	Витковая изоляция									
1	Вертикальная бумажная прокладка	0,2	0,2	0,4	—	—	—	—	—	—
2	Микалента, один слой, вполуперекрой	—	1,2	1,2	2,4	3,6	4,8	6,8	7,2	8,4
	Разбухание изоляции	—	0,8	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Корпусная изоляция									
3	Микалента для 10 500 *в*	—	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
	13 800 *в*	—	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
	15 750 *в*	—	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
4	Асбестовая лента, один слой, впритык	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Лакировка	—	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Всего на катушечную сторону для: 10 500 *в*	—	10,4	10,8	12,6	13,8	15,0	16,2	17,4	18,6
	13 800 *в*	—	11,9	12,3	14,1	15,3	16,5	17,7	18,9	20,1
	15 750 *в*	—	12,9	13,3	15,1	16,3	17,5	18,7	19,9	21,1
5	Электрокартон ЭВ, прокладки в пазу	0,5—2,5	—	—	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	Зазор на укладку	—	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Всего на паз для: 10 500 *в*	—	10,9	11,3	29,5	31,9	34,3	36,7	39,1	41,5
	13 800 *в*	—	12,4	12,8	32,5	34,9	37,3	39,7	42,1	44,5
	15 750 *в*	—	13,4	13,8	34,5	36,9	39,3	41,7	44,1	46,5

Позиция на рис. 14-13	Наименование	Толщина материала, *мм*	Двусторонняя толщина изоляции, *мм*							
			по ширине при числе проводников в одном слое паза		по высоте при числе витков в катушке					
			2	3	2	3	4	5	6	7
	Лобовая часть									
	Витковая изоляция									
7	Микалента, один слой, вполуперекрой	—	1,2	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4
	Разбухание изоляции	—	1,5	2,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	Корпусная изоляция									
8	Микалента для 10 500 *в*	—	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
	13 800 *в*	—	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
	15 750 *в*	—	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
9	Хлопчатобумажная или стеклянная лента, один слой, вполуперекрой	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Лакировка	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Всего на катушечную сторону для: 10 500 *в*	—	10,3	11,3	15,0	16,2	17,4	18,6	19,8	20,0
	13 800 *в*	—	11,8	12,8	16,5	17,7	18,9	20,1	21,6	23,1
	15 750 *в*	—	12,8	13,8	17,5	18,7	19,9	21,1	22,6	24,1

Примечание. Клин (поз. *6*) делается из текстолита, специальной пластмассы.

сторонняя толщина изоляции по ширине паза (из табл. 14-11).

Затем по табл. IV-2 выбираем размер b, ближайший к $b=b_{из}-(0,27\div0,33)$.

Сечение s_c ($\leqslant 18$ *мм²*) при данном b следует подобрать по той же табл. IV-2 так, чтобы размер проводника a был не больше 2,63 *мм* (обычно $a=1,81\div2,63$ *мм*); при этом из (14-38) определяется число $n_{эл}$, которое должно быть четным. Здесь при определении $b_{из}$ допускается небольшое изменение ширины паза $b_{п1}$, а при определении s_c и $n_{эл}$ — плотности тока Δ_c, которая после окончательного выбора s_c и $n_{эл}$ должна быть проверена.

Высота паза определяется по формуле

$$h_{п1}=2\left(\frac{n_{эл}}{2}+1\right)a_{из}+ \\ +\delta_{и.в}+h_к,\ мм, \qquad (14\text{-}40)$$

где $\delta_{и.в}$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза (из табл. 14-11); $h_к$ — высота клина (обычно $h_к=9$ *мм*); высота стержня $\left(\frac{n_{эл}}{2}+1\right)a_{из}$ взята с учетом углублений в местах переходов элементарных проводников, заполняемых обычно полосками асбестовой бумаги, склеенными лаками. Размер $h_{п1}$ округляется с точностью до 0,5 *мм*. Обычно для крупных гидрогенераторов $h_{п1}\approx(5,5\div7,5)\,b_{п1}$.

Правильность выбора размеров паза должна быть проверена по индукциям $B_{z1м}$ и B_c, а также по температурному перепаду в пазовой изоляции $\Theta_и$ (для катушечной и для стержневой обмоток), который вычисляется по формуле (см. § 11-6) *

$$\Theta_и=\frac{\Delta_c A k_f}{4\,200}\,\frac{t_1}{2\,(b_{п1}+h_{п1}-h_к)}\,\frac{\delta_{и1}}{\lambda_и},\ {}^\circ C, \qquad (14\text{-}41)$$

где k_f — коэффициент, учитывающий потери в проводниках от вихревых токов (предварительно $k_f\approx1,2$);

$\delta_{и1}$ — односторонняя толщина изоляции по ширине паза, *см*;

$\lambda_и$ — теплопроводность изоляции ($\lambda_и=0,0016$ при компаундированной изоляции, $\lambda_и=0,0010$ при некомпаундированной изоляции).

Для обмоток с изоляцией класса В температурный перепад $\Theta_и$ не должен превышать 32—35° С.

Следует также определить градиент температуры в изоляции

$$\Delta\Theta_и=\frac{\Theta_и}{\delta_{и1}},\ {}^\circ C/см, \qquad (14\text{-}42)$$

который при $U_{н.л}=6\,300\div15\,750$ *в* не должен быть больше 54—65° С/*см*. Если $U_{н.л}<6\,300$ *в*, то $\Delta\Theta_и$ можно довести до 80° С/*см*, но при этом температурный перепад $\Theta_и$ не должен превышать указанных значений.

Определение размеров проводников и паза для обмотки статора с водяным охлаждением рассматривается в дальнейшем применительно к крупным турбогенераторам с такой же обмоткой статора. Соответствующие расчеты в основном аналогичны для крупных гидрогенераторов и турбогенераторов.

в) **Турбогенераторы.** Обратимся к расчету обмотки, пазов и окончательному определению диаметров D и D_a статора турбогенератора (обозначения его основных размеров указаны на рис. 14-7).

Вначале для значения индукции $B_{\delta н}$, соответствующего принятым размерам D и l_δ (l_1) и обозначенному здесь через $B'_{\delta н}$, находим магнитный поток в зазоре

$$\Phi'_н=\frac{2}{\pi}\tau l_\delta B'_{\delta н},\ мкс. \qquad (14\text{-}43)$$

При $2p=2$ имеем:

$$\Phi'_н=\frac{2}{\pi}\,\frac{\pi D}{2}\,l_\delta B'_{\delta н}=Dl_\delta B'_{\delta н},\ мкс. \qquad (14\text{-}44)$$

Значение $\Phi_н$ колеблется примерно в пределах $(30\div700)\,10^6$ *мкс*, а при D и l_δ в метрах и $B_{\delta н}$ в тесла — в пределах 0,3—7 *в·сек*.

Затем определяем число последовательно соединенных витков фазы

$$w'_1=\frac{k_E U_н\cdot10^8}{4,44\,fk'_{о1}\Phi'_н} \qquad (14\text{-}45)$$

---

* В формуле (14-41), которая соответствует (11-96), величина γ_ϑ принята равной 4 200 (для компаундированной изоляции). При других видах изоляции значение γ_ϑ следует брать из табл. 11-8.

Таблица 14-11

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция стержневых одновитковых обмоток статора

Изоляция класса В. Провод марки ПСД или ПДА

Позиция на рис. 14-15	Наименование материала	Толщина материала, *мм*	Двусторонняя толщина по ширине, *мм*, при напряжении, *в*						Двусторонняя толщина по высоте, *мм*, при напряжении, *в*					
			до 3000	3 150	6 300	10 500	13 800	15 750	до 3 000	3 150	6 300	10 500	13 800	15 750
	Пазовая часть													
1	Прокладка вертикальная из миканита	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	—	—	—	—	—	—
2	Прокладки под переходами из миканита	0,2	—	—	—	—	—	—	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
3	Микалента ЛМЧ1	0,13	3,5	4,0	6,0	8,0	9,5	10,5	3,5	4,0	6,0	8,0	9,5	10,5
4	Асбестовая или киперная лента, один слой, впритык	0,5 (0,3)	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0
	Лакировка ленты	—	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Разбухание изоляции элементарных проводников (и допуск)	—	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0
	Всего на стержень	—	5,1	5,6	8,0	10,0	11,5	12,5	6,2	6,7	9,6	11,6	13,1	14,1
5	Электрокартон ЭВ, пропитанный на дне паза	0,5—1,0	—	—	—	—	—	—	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
6	То же между стержнями	1,0—1,5	—	—	—	—	—	—	2,0	2,0	2,5	3,0	3,0	3,0
7	То же под клином	1,0	—	—	—	—	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Зазор на укладку	—	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	Всего на паз (без клина)	—	5,4	5,9	8,3	10,5	12,0	13,0	16,1	17,1	23,4	28,5	31,5	33,5
	Лобовая часть													
9	Прокладка вертикальная из миканита	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	—	—	—	—	—	—
10	Микалента ЛМЧ1	0,13	3,0	3,5	5,5	7,5	9,0	10,0	3,0	3,5	5,5	7,5	9,0	10,0
11	Лента хлопчатобумажная или стеклянная, один слой, вполнахлеста	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Лакировка ленты	—	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Примечание. Для обмоток при напряжениях до 3 150 (6 300) *в* включительно асбестовая лента заменяется киперной.

(сюда подставляется предварительно принятое значение обмоточного коэффициента: при стержневой обмотке $k'_{o1} \approx 0{,}92$; при катушечной обмотке $k'_{o1} \approx 0{,}7$).

После этого выбирается число пазов на полюс и фазу q_1, которое, как правило, должно быть целым. Обычно при $D \leqslant 70$ *см*, $q_1 = 7 \div 4$, при $D > 70$ *см* $q_1 = 6 \div 12$. Оно должно соответствовать числу витков фазы.

Для статора турбогенератора применяется двухслойная петлевая обмотка, имеющая при $2p = 2$ шесть катушечных групп с q_1 катушками в каждой. На фазу приходятся две катушечные группы, которые могут быть соединены последовательно или параллельно (при a_1, равном одному или двум).

При числе эффективных проводников на паз $u_{п1}$, следовательно, при $u_{п1}/2$ витка в катушке для двухполюсной машины получим:

$$w_1 = u_{п1} q_1 \frac{1}{a_1}. \qquad (14\text{-}46)$$

Следует стремиться к тому, чтобы $u_{п1} = 2$. Обмотка при $u_{п1} = 2$, как отмечалось, получается наиболее надежной в отношении изоляции.

При $u_{п1} = 2$ применяется стержневая обмотка с шагом $y \approx 0{,}83\tau$. При $u_{п1} = 4$ обмотку также можно выполнить в виде стержневой с «паяными» головками витков, охватывающими одна другую, но такую обмотку обычно не применяют при $P_н > > 25$ *Мвт*. При $P_н < 6$ *Мвт* и $U_{н.л} = 6{,}3$ *кв* обычно $u_{п1} > 4$. В этом случае применяется катушечная обмотка с шагом $y \approx (0{,}5 \div 0{,}6)\tau$.

Значения $u_{п1}$, q_1 и a_1 в (14-46) надо выбрать так, чтобы полученное значение w_1 как можно меньше отличалось от w'_1 по (14-45).

После того как установлены значения w_1, q_1 и при этом шаг обмотки y, следует определить $\Phi_н$ и $B_{\delta н}$:

$$\Phi_н = \Phi'_н \frac{w'_1 k'_{o1}}{w_1 k_{o1}}, \ мкс; \qquad (14\text{-}47)$$

$$B_{\delta н} = B'_{\delta н} \frac{w'_1 k'_{o1}}{w_1 k_{o1}}, \ гс. \qquad (14\text{-}48)$$

Здесь k_{o1} должен быть определен для установленных значений q_1 и y (см. приложение VIII). Значение $B_{\delta н}$ не должно заметно отличаться от принятого.

Следует проверить также линейную нагрузку

$$A = \frac{6 w_1 I_н}{\pi D}, \ а/см. \qquad (14\text{-}49)$$

Полное число пазов статора

$$Z_1 = 6 p q_1. \qquad (14\text{-}50)$$

При определении размеров паза статора вначале определяется его ширина $b_{п1}$. Она может быть предварительно взята из соотношения

$$b_{п1} \approx (0{,}4 \div 0{,}48)\, t_1, \ см, \qquad (14\text{-}51)$$

где пазовое деление

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}, \ см. \qquad (14\text{-}52)$$

Обычно $t_1 = 3{,}5 \div 7$ *см* для турбогенераторов Т2 и ТВ и $t_1 = 4{,}5 \div 12$ *см* для турбогенераторов ТВФ и ТВВ (t_1 возрастает с мощностью $P_н$; высшие значения t_1 — до 12 *см* относятся к ТВВ при $P_н > 320$ *Мвт*).

Можно также сначала найти ширину коронки зубца статора, задаваясь индукцией $B_{z1м}$,

$$b_{z1} \approx \frac{B_{\delta н}\, t_1\, l_\delta}{B_{z1м}\, l k_c}, \ см, \qquad (14\text{-}53)$$

где $k_c = 0{,}93$; $B_{z1м} = 16\,300 \div 20\,500$ *гс* (возрастает с $P_н$), и затем определить ширину паза $b_{п1} \approx t_1 - b_{z1}$.

После того как выбраны $u_п$, a_1 и $b_{п1}$, можно приступить к определению размеров проводников статорной обмотки турбогенератора.

Предварительно сечение эффективного проводника $s_1 = n_{эл} s_c$ определяется по (14-38в); при этом плотность тока Δ_c выбирается в зависимости от $U_{н.л}$, способа охлаждения обмотки, а также от ширины паза.

Для турбогенераторов с косвенным воздушным охлаждением:

при $U_{н.л} = 6{,}3$ *кв* и $b_{п1} = 1{,}6 \div 2{,}4$ *см* $\Delta_c = 4 \div 2{,}8$ *а/мм²*;
при $U_{н.л} = 10{,}5$ *кв* и $b_{п1} = 2 \div 3$ *см* $\Delta_c = 3{,}3 \div 2{,}3$ *а/мм²*;
при $U_{н.л} = 15{,}75$ *кв* и $b_{п1} = 2{,}4 \div 3{,}4$ *см* $\Delta_c = 2{,}7 \div 2$ *а/мм²*
(чем больше $b_{п1}$, тем меньше должна быть Δ_c).

При $U_{н.л}=3{,}15$ *кв* плотность тока $\Delta_с$ можно увеличить на 5—10%.

Для турбогенераторов с косвенным водородным охлаждением обмотки статора (типы ТВ и ТВФ) указанные выше плотности тока $\Delta_с$ могут быть повышены на 15—20% (больше для ТВФ).

При катушечной обмотке ($u_{п1}>>4$) число элементарных проводни-

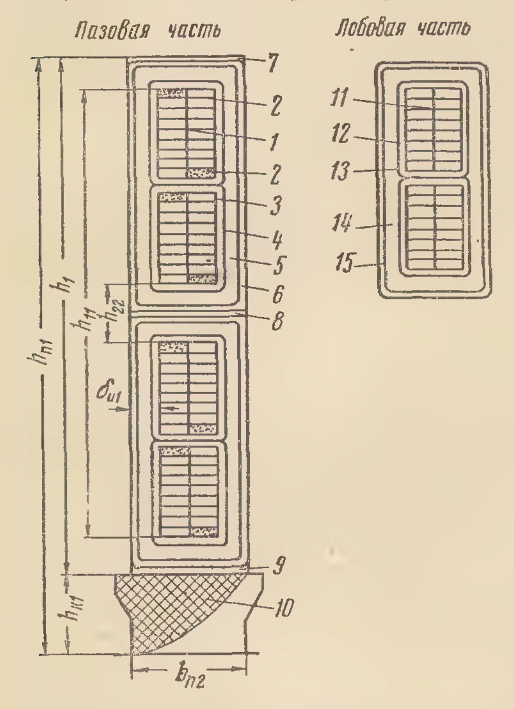


Рис. 14-16. Паз статора с проводниками и изоляцией стержневой обмотки и сечение лобовой части при $u_{п1}=4$ (см. табл. 14-12).

ков $n_{эл}$ обычно не превышает шести, сечение элементарного проводника $s_c \leqslant 18$ *мм*^{2}.

При стержневой обмотке ($u_{п1}=2$ или $u_{п1}=4$) $s_c=10 \div 16$ *мм*^{2} (реже до 18 *мм*^{2}), число $n_{эл}$ определяется так же, как для стержня обмотки гидрогенератора.

При окончательном определении $b_{п1}$ и $h_{п1}$ следует обратиться к приведенным ранее формулам и к табл. 14-9, 14-10 или 14-11, где указаны размеры изоляции для обмоток статора гидрогенераторов и турбогенераторов.

Если применяется стержневая обмотка при $u_{п1}=4$, то при определении $b_{п1}$ и $h_{п1}$ следует обратиться к табл. 14-12 и рис. 14-16 [$h_{п1}$ определяется по (14-40), где на правой стороне вместо множителя 2 надо подставить 4].

Высота пазового клина $h_к$ для турбогенератора должна быть взята большей, чем для гидрогенератора,

$$h_к \approx (0{,}9 \div 1{,}1)\, b_{п1}.$$

Здесь также следует определить температурный перепад в изоляции $\Theta_и$ по (14-41) для проверки правильности выбора размеров $b_{п1}$, $h_{п1}$ и плотности тока $\Delta_с$ [для турбогенераторов с водородным охлаждением значение $\Theta_и$ по (14-41) нужно умножить на 0,92—0,95]. Для обмоток статора с косвенным охлаждением температурный перепад $\Theta_и$ не должен превышать 35—40° С.

Обратимся к турбогенераторам типа ТВВ, имеющим обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением. Она всегда выполняется как стержневая с $u_{п1}=2$ (для очень крупных турбогенераторов, если необходимо снизить $U_{н.л}$, может оказаться целесообразным применение однослойной стержневой обмотки с $u_{п1}=1$).

Для крупных турбогенераторов (при $P_н \geqslant 250$ *Мвт*) приходится выбирать высокие напряжения $U_{н.л}$, достигающие 18—24 *кв* для уменьшения токов в соединительных шинах и главным образом в выводных шинах. В то же время в таких машинах при магнитных потоках, соответствующих их размерам, при $a_1=2$ и $q_1=6 \div 10$ напряжения $U_{н.л}$ достигают указанных значений. Можно было бы для понижения $U_{н.л}$ применить специальную обмотку с $a_1=4$, но при этом получились бы чрезмерные токи в выводных шинах.

Для турбогенераторов при $P_н>150$ *Мвт* для уменьшения $U_{н.л}$ обычно выбирается $q_1=6 \div 8$, что допустимо при водяном охлаждении обмотки статора. Здесь также q_1 необходимо выбрать в соответствии с (14-45) и (14-46); w_1 должно быть как можно ближе к w'.

При расчете обмотки после выбора q_1, t_1, $b_{п1}$ сначала надо предварительно определить сечение эффек-

Таблица 14-12

Непрерывная микалентная компаундированная изоляция стержневых двухвитковых обмоток статора турбогенераторов

Изоляция класса В. Провод марки ПСД или ПДА

Позиция на рис. 14-16	Наименование материала	Толщина материала, *мм*	Двусторонняя толщина, *мм*: по ширине, 6 300 *в*	по ширине, 10 500 *в*	по высоте, 6 300 *в*	по высоте, 10 500 *в*
	Пазовая часть					
	Витковая изоляция					
1	Прокладка вертикальная из миканита	0,5	0,5	0,5	—	—
2	Прокладка под переходами из миканита	0,2	—	—	0,8	0,8
	Разбухание витковой изоляции (и допуск)	—	0,3	0,3	1,3	1,5
3	Микалента, вполуперекрой	0,13	1,5	2,5	3,0	5,0
4	Хлопчатобумажная лента, один слой, впритык	0,20	0,4	0,4	0,8	0,8
	Корпусная изоляция					
5	Микалента	0,13	4,5	5,0	4,5	5,0
6	Асбестовая лента	0,50	1,0	1,0	1,0	1,0
	Лакировка	—	0,2	0,2	0,2	0,2
	Всего на одну катушечную сторону	—	8,4	9,9	11,6	14,3
7	Электрокартон ЭВ пропитанный, на дне паза	0,5	—	—	0,5	0,5
8	То же между катушечными сторонами	1,0—1,5	—	—	2,0	2,5
9	То же под клином	1,0	—	—	1,0	1,0
	Зазор на укладку	—	0,5	0,5	0,2	0,3
	Всего на паз (без клина)	—	8,9	10,4	26,9	32,9
	Лобовая часть					
	Витковая изоляция					
11	Прокладка вертикальная из миканита	0,5	0,5	0,5	—	—
12	Микалента вполуперекрой	0,13	1,5	3,5	3,0	7,0
13	Хлопчатобумажная лента, один слой, впритык	0,2	0,4	0,4	0,8	0,8
	Разбухание витковой изоляции (и допуск)	—	2,0	2,0	5,0	5,0
	Корпусная изоляция					
14	Микалента	—	4,0	4,5	4,0	4,5
15	Хлопчатобумажная лента, один слой, вполуперекрой	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8
	Лакировка	—	0,3	0,3	0,3	0,3
	Всего на катушечную сторону	—	9,5	12,0	13,0	18,4

тивного проводника $s_1 = n_{эл} s_c$ по (14-38в), задавшись плотностью тока Δ_c. Она обычно в 2—2,5 раза больше, чем для обмотки с косвенным охлаждением.

При водяном охлаждении обмотки можно принять, что все потери в ней отводятся водой, протекающей внутри полых проводников. Поэтому здесь при выборе плотности тока Δ_c можно не учитывать напряжения $U_{н.л}$, от которого зависит толщина пазовой изоляции и, следовательно, температурный перепад $\Theta_и$ при косвенном охлаждении обмотки.

Если скорость течения воды в полых проводниках обмотки равна 0,8—1,0 *м/сек* (обычно около 0,9 *м/сек*) и «полный ток паза»

$I_п = u_{п1}\frac{I_н}{a_1} = 2\frac{I_н}{2}$, *а* не превышает 10 000 *а*, то можно взять $\Delta_c = 6 \div 7$ *а/мм²*. Значение Δ_c в этом случае обычно ограничивается не нагревом обмотки, а допустимым снижением к. п. д. машины; нагрев же обмотки при этом иногда получается заметно ниже допустимого.

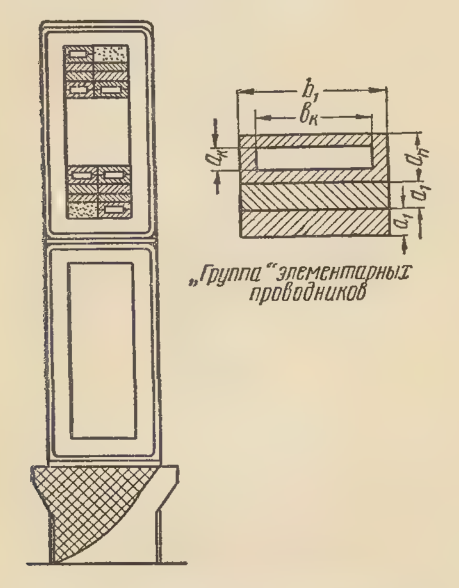


Рис. 14-17. Паз статора с проводниками и изоляцией при внутреннем водяном охлаждении его обмотки. (Для $U_{н.л}$, равного 18 000, 20 000, 24 000 *в*, изоляция та же, что и в табл. 14-11 для $U_{н.л} = 15\,750$ *в*, за исключением позиций *3* и *10*: соответственно указанным напряжениям следует взять по поз. *3* — 12,0; 13,5; 17,5 *мм* и по поз. *10* — 11,5; 13,0; 17,0 *мм*.)

Если $I_п > 10\,000$ *а*, то при ширине паза $b_{п1} \approx 3 \div 5$ *см* плотность тока Δ_c в зависимости от $I'_п = I_п \cdot 10^{-3}$ *ка* и $b_{п1}$ рекомендуется определить по следующей формуле:

$$\Delta_c \approx \frac{15{,}75}{b_{п1}} + \frac{I'_п - 10}{2[1 + 0{,}3\,(b_{п1} - 3)]}, \; а/мм^2. \qquad (14\text{-}54)$$

Для обмотки с водяным охлаждением с целью уменьшения добавочных потерь от вихревых токов и получения достаточных по сечению отверстий в элементарных проводниках не все они делаются полыми. Обычно из общего числа элементарных проводников, составляющих эффективный проводник (транспонированный стержень), одна треть приходится на полые проводники и две трети — на сплошные. Расположение полых и сплошных проводников в стержне показано на рис. 14-17.

Как видно на этом рисунке, число элементарных проводников в одном вертикальном ряду стержня должно быть кратно трем; следовательно, в нем имеется число групп, состоящих каждая из двух сплошных проводников и одного полого, $m_{гр} = \frac{n_{эл}}{2 \cdot 3}$.

После определения $s_1 = n_{эл} s_c$ по (14-38в) следует выбрать сечение элементарных проводников: сплошного $s_{спл} \approx a_1 \times b_1$, *мм²* и полого $s_п \approx [(a_п \times b_1) - (a_к \times b_к)]$, *мм²*. Размер b_1 выбирается, как было указано, в соответствии с шириной паза $b_{п1}$ и с учетом изоляции (рис. 14-17); размер a_1 не рекомендуется брать больше 2,63 *мм* ($s_{спл} < 18$ *мм²*).

При принятом расположении полых и сплошных проводников в стержне полый проводник можно брать без внешнего изоляционного покрытия (или для повышения надежности обернутым тонкой стеклянной лентой). Его ширина берется равной ширине сплошного проводника, высота $a_п$ примерно в 1,8—2,8 раза больше a_1 (рис. 14-17). Обычно высота прямоугольного отверстия (канала) $a_к$ в проводнике берется равной 2 *мм*; высота $a_п$ равной 4; 4,5 или 5 *мм* при толщине стенки $\Delta_{ст}$ соответственно 1; 1,25 или 1,5 *мм*; следовательно, ширина канала $b_к = b_1 - 2\Delta_{ст}$.

Выбрав $s_{спл}$ и $s_п$, определяем сечение группы проводников (одного полого и двух сплошных) $s_{гр} = s_п + 2s_{спл}$; число групп в вертикальном ряду $m_{гр} = \frac{s_1}{2s_{гр}}$ и число элементарных проводников стержня $n_{эл} = 6m_{гр}$. Так как $m_{гр}$ должно быть целым числом, то окончательное значение s_1 устанавливается путем подбора указанных размеров проводников. Оно не должно заметно отличаться от s_1, найденного по (14-38в).

После того как установлены размеры проводников и $n_{эл}$, определяется высота паза по (14-40) с учетом изоляции и высоты клина (рис. 14-17).

Для статоров современных турбогенераторов применяется, как правило, высоколегированная электротехническая сталь марок Э42, Э43

Машины на мощности $P_н \leqslant 1,5$ *Мвт* удается выполнить с диаметром $D_a = 990$ *мм*, что позволяет собирать пакеты статора из целых листов. При $P_н \geqslant 2$ *Мвт* обычно приходится переходить на сборку пакетов из сегментов. При этом следует обеспечить рациональный раскрой листов электротехнической ста-

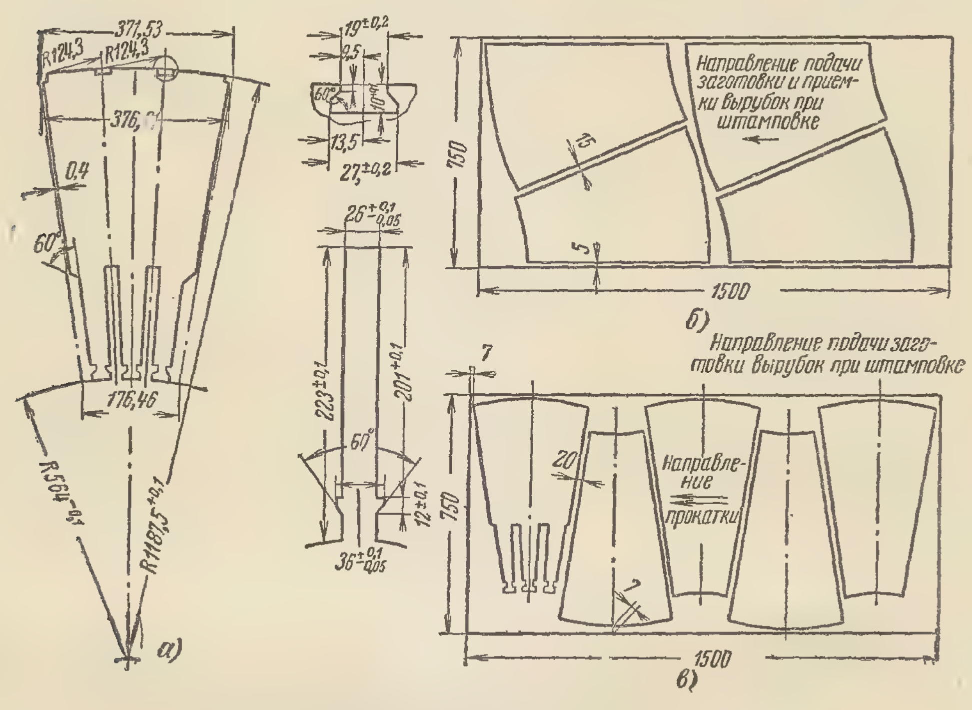


Рис. 14-18. Сегмент пакета статора и раскрой листов.

а — сегмент пакета статора турбогенератора на 100 *Мвт*; *б* — схема раскроя листа при штамповке сегментов из горячекатаной стали марки Э42; *в* — то же из холоднокатаной стали марки Э330

и холоднокатаная сталь марки Э330 толщиной 0,5 *мм* (последняя применяется в настоящее время главным образом при $P_н \geqslant 150$ *Мвт*).

Высота ярма статора

$$h_c = \frac{\Phi_н}{2l\,k_c\,B_c}, \text{ см} \qquad (14\text{-}55)$$

($B_c \approx 14\,000 \div 16\,000$ *гц* при стали Э42, Э43 и $B_c \approx 16\,000 \div 17\,500$ *гс* при стали Э330).

Определив h_c, найдем внешний диаметр пакетов статора

$$D_a = D + 2\,(h_{п1} + h_c), \text{ см}. \qquad (14\text{-}56)$$

Для двухполюсных турбогенераторов обычно имеем:

$$D_a : D \approx 2 \div 2,1.$$

ли с возможно меньшими отходами (рис. 14-18).

Статор турбогенератора делается неразъемным. Сегменты его пакетов надеваются на «ласточкины хвосты» клиньев, имеющих резьбовые концы (рис. 14-19). Такие клинья используются и как стяжные шпильки. По длине клиньев делаются косые прорези (с расстоянием между ними в 50—60 *см*) для облегчения надевания на них сегментов.

На рис. 14-19 показаны клинья для турбогенераторов при $P_н \leqslant 100$ *Мвт* и при $P_н \geqslant 150$ *Мвт*, причем последние имеют вырезы в том месте, где они привариваются к внутренним стенкам корпуса статора. Такой способ сочленения сердеч-

ника статора с его корпусом является одним из способов упругой (эластичной) подвески сердечника статора.

Опыт показывает, что она необходима для турбогенераторов указанных мощностей. При жестком закреплении сердечника статора в таких турбогенераторах его переменная деформация под действием сил магнитного притяжения, изменяющихся с частотой 100 *гц*, в полной мере передавалась бы корпусу статора, что привело бы к недопустимым его вибрациям. С увеличением мощности турбогенераторов типа ТВВ при практически неизменных габаритах значительно повышается механическая напряженность конструктивных узлов и деталей статора.

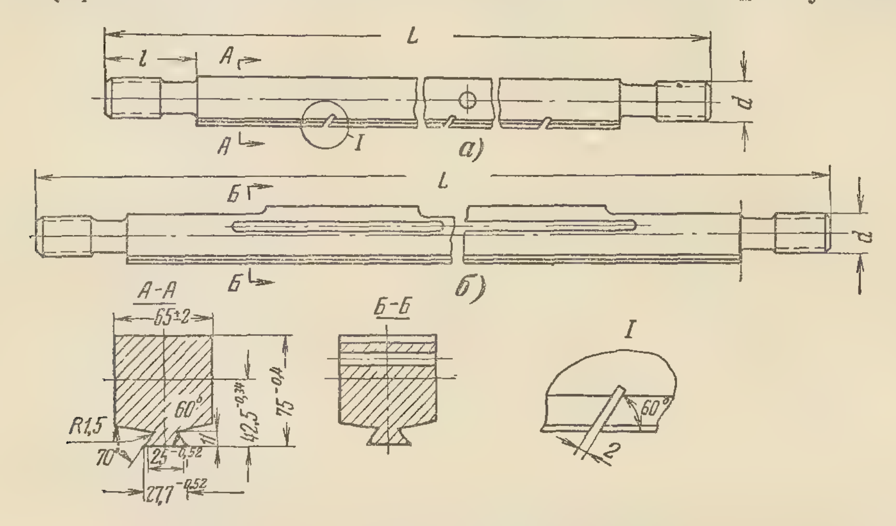


Рис. 14-19. Клинья статора.

а — для турбогенераторов типа ТВФ мощностью $P_н \leqslant 100$ *Мвт*; *б* — для турбогенераторов типов ТВФ и ТВВ мощностью $P_н \geqslant 150$ *Мвт*.

Поэтому создание крупных турбогенераторов при $P_н \geqslant 500$ *Мвт*, имеющих достаточную виброустойчивость, является одной из наиболее сложных задач современного турбогенераторостроения.

14-5. ЗАЗОР

а) **Явнополюсные машины.** Зазор между статором и ротором δ, называемый в применении к машинам с воздушным охлаждением воздушным зазором, является для синхронной машины, как и для других электрических машин, одним из наиболее важных размеров, определяющих ее технико-экономические характеристики.

От длины δ в основном зависит синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d (имеется в виду «ненасыщенное» значение), а от последнего, как известно, зависят максимальный вращающий момент машины $M_м$ и установившийся ток короткого замыкания $I_к$: чем больше δ, тем меньше x_d и, следовательно, тем больше $M_м$ и $I_к$.

Для нормальных явнополюсных генераторов и двигателей значение x_d^* в относительных единицах выбирается в пределах 1—1,6, в среднем $x_d^* \approx 1{,}3$ отн. ед.

Для двигателей, которые должны иметь повышенный максимальный момент $M_м$, иногда выбирается $x_d^* < 1$. Стоимость таких машин заметно повышается, так как при увеличенном зазоре возрастают расход меди для обмотки возбуждения и размеры полюсов, что в ряде случаев вызывает необходимость увеличения главных размеров машины.

В синхронных компенсаторах для уменьшения расхода меди на обмотку возбуждения и, следовательно, уменьшения размеров полюсов делается относительно небольшой зазор δ, что приводит к повышенному

значению x_d^* — до 1,8—2,2 отн. ед.

Величину δ можно найти, задаваясь значением x_d^*. Связь между δ и x_d^* устанавливается на основе известных из теории синхронных машин соотношений.

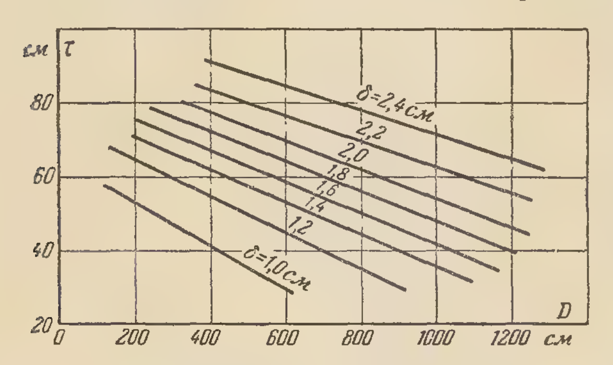


Рис. 14-20. Минимальный допустимый зазор δ в зависимости от внутреннего диаметра статора D и полюсного деления τ.

Синхронное индуктивное сопротивление

$$x_d^* = x_\sigma^* + x_{ad}^*, \text{ отн. ед.,} \quad (14\text{-}57)$$

где x_{ad}^* — индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси.

Как известно [Л. 2 или 12], x_{ad}^* в относительных единицах равно:

$$x_{ad}^* = \frac{k_{ad} F_a}{k' F_{\delta 0}} =$$

$$= \frac{k_{ad} \cdot 0{,}9\, m I_н \dfrac{w_1 k_{o1}}{p}}{k' \cdot 1{,}6\, B_{\delta 0}\, \delta k_\delta}; \quad (14\text{-}58)$$

здесь k' учитывает зазоры между полюсными сердечниками и ярмом ротора; $B_{\delta 0}$ — индукция в основном зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении.

При стальном ярме $k' \approx 1{,}04 \div 1{,}08$; при чугунном ярме $k' \approx \approx 1{,}08 \div 1{,}14$ (меньшие значения относятся к машинам при $\tau = 40$ *см* и больше), чему соответствует зазор $\delta_{ст} \approx 0{,}012 \div 0{,}030$ *см* и $\delta_{ст} \approx \approx 0{,}018 \div 0{,}045$ *см*.

Если принять в среднем $k_{ad} \approx 0{,}83$ (рис. 6-23), $k_{o1} \approx 0{,}92$, $k_\delta \approx 1{,}2$, то из (14-57) и (14-58) получим:

$$\delta \approx \frac{0{,}36\, A\tau}{k' \left(x_d^* - x_\sigma^*\right) B_{\delta 0}}, \text{ см,} \quad (14\text{-}59)$$

где $x_\sigma^* \approx 0{,}08 \div 0{,}18$ отн. ед. (с увеличением $P_н$ и $2p$ x_σ^* возрастает; высшие значения относятся к крупным многополюсным машинам).

Современные нормальные (серийные) синхронные двигатели предназначаются для работы при $\cos \varphi_н = 0{,}9$; в этом случае для получения надлежащей кратности максимального момента $M_м/M_н$ не следует брать x_d^* больше примерно 1,3—1,4. Для указанных двигателей согласно ГОСТ 183-66 необходимо иметь $M_м/M_н \geqslant 1{,}65$.

Машины с массивными полюсными наконечниками для уменьшения в таких наконечниках поверхностных потерь из-за зубчатости статора делаются с увеличенных зазором δ. Для них рекомендуется брать $x_d^* \approx 1{,}0 \div 1{,}2$.

Для крупных гидрогенераторов зазор под серединой полюса, найденный по (14-59), может оказаться недостаточным по механическим и технологическим причинам (прогиб ротора и статора, условия сборки и установки машины). Поэтому для таких машин зазор δ не должен быть меньше указанных на рис. 14-20 (представленные здесь кривые рекомендуются заводом «Электросила»).

Статическая перегружаемость гидрогенераторов $S = M_м/M_н$ согласно ГОСТ 5616-63 должна быть не ниже 1,7. Для получения $S \approx 1{,}73 \div 1{,}85$ можно принять $x_d^* \approx 1{,}75$; 1,6; 1,35 соответственно при $\cos \varphi_н = 0{,}8$; 0,85; 0,9.

Если требуются более высокие значения S, то приходится снижать x_d^* (иногда до 0,6—0,7).

При окончательном определении зазора δ следует взять из его значений по (14-59) и по рис. 14-20 большее значение.

б) **Турбогенераторы.** Обратимся к определению зазора δ турбогенераторов.

Ротор турбогенератора несет большие нагрузки в отношении как механических напряженностей в его ярме, зубцах, кольцевых бандажах,

так и теплового режима его обмотки. Поэтому для турбогенератора особенно важно уменьшить зазор δ, чтобы н. с. обмотки ротора и необходимое для нее количество меди были по возможности минимальными.

Так как согласно ГОСТ 533-51 статическая перегружаемость S турбогенератора может быть равна 1,7 (S должна быть не ниже 1,7), то целесообразно выбрать такой зазор δ, чтобы была обеспечена именно эта перегружаемость.

Для турбогенераторов при $P_н > 300 \div 400$ *Мвт* значение S по согласованным техническим условиям может быть снижено до 1,5.

Можно определить δ, как и для других синхронных машин, исходя из заданных (или выбранных) значений ОКЗ или x_d^*. Иногда ОКЗ выбиралось в пределах 0,6—0,9, что приводило к значению S, заметно превышающему 1,7 (до 2,0—2,2).

В ряде случаев (обычно при $P_н \leqslant 6$ *Мвт*) приходится выбирать δ бóльшим, чем это требуется по условиям статической перегружаемости, для уменьшения поверхностных потерь в стали ротора из-за зубчатости статора. Рекомендуется при $P_н \geqslant 12$ *Мвт* выбирать $\delta \geqslant (0,45 \div 0,5) t_1$, так как при меньших значениях δ эти потери резко возрастают.

Если δ определяется по заданному x_d^* или ОКЗ (ОКЗ $\approx 1,16/x_d^*$ в соответствии с нормальной характеристикой холостого хода по ОСТ 7429), то при этом можно исходить из формулы

$$x_{ad}^* = 0,563 \frac{k_{01}}{k_\delta} \frac{\tau}{\delta} \frac{A}{B_{\delta 0}}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}60)$$

Формула (14-60) получается из равенства $x_{ad} = E/I$, если сюда подставить

$$E = 4,44 f w_1 k_{01} \left(\frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_\delta \right) 10^{-8}$$

и $I = F_\delta p / 2,7 w_1 k_{01}$ при $F_\delta = 1,6 \delta k_\delta B_\delta$ (для ненасыщенной машины), затем полученное выражение умножить на $I_н / U_н$ и учесть, что $A = 6 w_1 I_н / 2 p \tau$ и

$$U_н = 4,44 f w_1 k_{01} \left(\frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_{\delta 0} \right) 10^{-8}.$$

Значения x_d^* и x_σ^* современных турбогенераторов приведены в табл. 14-9а.

Таблица 14-9а

$P_н$, *Мвт*	x_d^*, отн. ед.	x_σ^*, отн. ед.
1—6	1,6 —1,8	0,10—0,13
6—50	1,7 —2,2	0,11—0,14
50—100	1,75—1,8	0,12—0,15
100—150	1,75—1,87	0,13—0,16
150—320	1,75—1,90	0,17—0,20

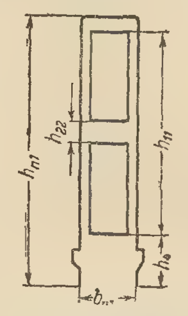


Рис. 14-21. Размеры паза статора (к определению $x_п$ и x_0).

Приведенные в табл. 14-9а примерные значения x_d^* и x_σ^* относятся к турбогенераторам, предназначенным для работы при $P_н = 1 \div 50$ *Мвт* с $\cos\varphi_н = 0,8$, а при $P_н = 50 \div 320$ *Мвт* с $\cos\varphi_н = 0,85$. Последняя строка относится к турбогенераторам типа ТВВ.

Зная x_d^* и x_σ^*, определяем $x_{ad}^* = x_d^* - x_\sigma^*$ и из (14-60) зазор δ:

$$\delta = 0,563 \frac{k_{01}}{k_\delta} \frac{\tau}{x_{ad}^*} \frac{A}{B_{\delta 0}}, \text{ см}, \quad (14\text{-}61)$$

где коэффициент зазора $k_\delta \approx 1,2 \div 1,1$ (больше при $P_н < 25$ *Мвт*).

Целесообразно при определении δ исходить, как отмечалось, из статической перегружаемости S. Для этого следует предварительно рассчитать x_σ^*:

$$x_\sigma^* \approx x_п^* + x_л^* + (0,005 \div 0,01), \text{ отн. ед}, \quad (14\text{-}62)$$

где индуктивное сопротивление пазового рассеяния (рис. 14-21)

$$x_п^* = k_x \frac{2 l'_\delta}{Z_1} k_\beta \left(\frac{h_{11}}{3 b_{п1}} + \frac{h_4}{b_{п1}} \right), \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}63)$$

индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей

$x^*_{л} = k_x k_\mu \cdot 0{,}43\, l_{л1} k^2_{01}$, отн. ед.; (14-64)

добавка (0,005—0,01) взята для приближенного учета рассеяния между коронками зубцов и дифференциального (больше при $P_н \leqslant 6$ *Мвт*; при $P_н \geqslant 100$ *Мвт* ею можно пренебречь).

В приведенных формулах при $f = 50$ *гц* имеем:

$$k_x = 0{,}235\left(\frac{w_1}{10}\right)^2 \frac{I_н}{U_н}\cdot 10^{-2}; \quad (14\text{-}65)$$

$$k_\beta = 0{,}75\beta + 0{,}25 \text{ при } \beta \geqslant 2/3;$$

$$k_\beta = 1{,}5\beta - 0{,}25 \text{ при } \beta \leqslant 2/3;$$

$$l'_\delta \approx l_1 - 0{,}2\, n_в b_в, \text{ см}; \quad (14\text{-}66)$$

$k_\mu \approx 0{,}32$ при немагнитных бандажах ротора (обычно при $P_н \geqslant 25$ *Мвт*); $k_\mu = 0{,}48$ при магнитных бандажах ротора (при $P_н \geqslant 12$ *Мвт*; если применяются бандажи из дюралюминия, то $k_\mu \approx 0{,}32$); длина лобовой части

$$l_{л1} \approx (1{,}6 \div 1{,}8)(2U_{н.л} + \beta\tau), \text{ см}, \quad (14\text{-}67)$$

где $U_{н.л}$ — линейное напряжение, *кв*; коэффициент в правой части берется тем больше, чем больше q_1 и $U_{н.л}$.

Из приведенных формул следует, что x^*_σ можно принять приблизительно пропорциональным отношению

$$\frac{w_1^2 I_н}{U_н} = \frac{A}{B_{\delta 0}},$$

так как размерные соотношения паза мало изменяются. В современных крупных турбогенераторах при уменьшенных размерах D и l_1 или при их предельных значениях для получения надлежащей мощности приходится увеличивать A, так как увеличение $B_{\delta 0}$ ограничено допустимым насыщением зубцов и частично потерями в стали зубцов и поверхностном слое массивного ротора. Поэтому в таких турбогенераторах согласно указанному отношению получаются высокие значения x^*_σ (см. табл. 14-9а).

Метод определения δ по заданному значению S основывается на соотношениях, вытекающих из векторной диаграммы Потье, представленной на рис. 14-22, где $x^*_р \approx x^*_\sigma + 0{,}02$ ($x^*_р$ — индуктивное сопротивление Потье, применяемое здесь взамен x_σ в основном для приближенного учета увеличения магнитных напряжений роторных участков магнитной цепи машины, обусловленного полем рассеяния ротора, соответствующим н. с. $F_{в.н}$, а не н. с. F_r).

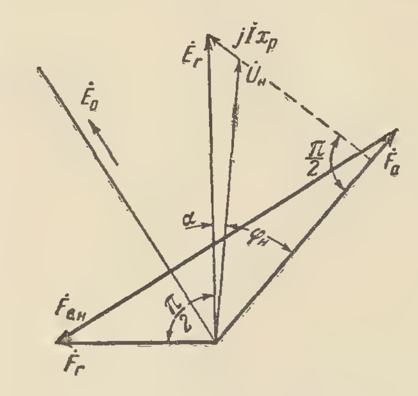


Рис. 14-22. Диаграмма Потье [к выводу формул (14-68) — (14-70)].

В соответствии с этой диаграммой имеем:

$$E^*_r = \sqrt{1 + x^*_р(2\sin\varphi_н + x^*_р)}, \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}68)$$

$$\sin\alpha = \frac{x^*_р \cos\varphi_н}{E^*_r}; \quad (14\text{-}69)$$

$$F^*_{в.н} = \sqrt{F^{*2}_r + F^{*2}_a + 2F^*_r F^*_a \sin(\alpha + \varphi_н)}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}70)$$

Здесь все величины выражены в относительных единицах. Для облегчения расчетов за базисную единицу н. с. принимаем н. с. обмотки возбуждения, соответствующую номинальному напряжению ($U^*_н = 1$) по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода. В этом случае можем считать $F^*_a = x^*_{ad}$, приняв в равенстве $F_{в.э} = k_a F_a$ коэффициент приведения н. с. якоря F_a к эквивалентной н. с. обмотки возбуждения $F_{в.э}$ равным единице ($k_a = 1$).

Напишем также выражение для статической перегружаемости:

$$S = \frac{M_м}{M_н} \approx$$

$$\approx \frac{F^*_{в.н}}{(x^*_{ad} + x^*_р)\cos\varphi_н}, \text{ отн. ед.}, \quad (14\text{-}71)$$

где принято $x^*_{р} \approx x^*_{\sigma}$.

Из (14-70) и (14-71) получим:

$$x^*_{ad} \approx \frac{b - a x^*_{р} + \sqrt{b^2 - 2ba\, x^*_{р} + F^{*2}_r (a-1) + a x^{*2}_{р}}}{a-1}, \text{ отн. ед.}, \quad (14\text{-}72)$$

где $a = (S \cos \varphi_{н})^2$ и $b = F^*_r \sin(\alpha + \varphi_{н})$.

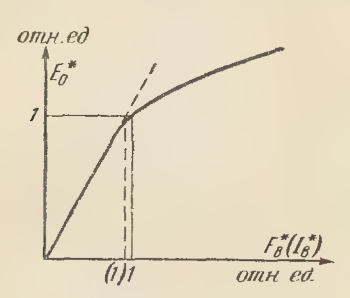


Рис. 14-23. Нормальная характеристика холостого хода.

$I^*_{в}$, отн. ед	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
E^*_{0}, отн. ед	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51

По (14-72) можно рассчитать x^*_{ad} при известном $x^*_{р}$ и заданных $\cos\varphi_{н}$ и S. Значение н. с. F^*_r можно определить для рассчитанного по (14-68) значения э. д. с. E_r по нормальной характеристике холостого хода, представленной на рис. 14-23 (как отмечалось, здесь при определении F^*_r за единицу н. с. принимается н. с. обмотки возбуждения, указанная на рис. 14-23 в скобках). Угол α определяется по (14-69).

На рис. 14-24 представлены кривые $x^*_{ad} = f(x^*_{р})$ для различных S и $\cos\varphi_{н}$, рассчитанные по (14-72). Задаваясь статической перегружаемостью S, по этим кривым при известных $\cos\varphi_{н}$ и $x^*_{р}$ можно найти x^*_{ad} и затем по (14-61) определить зазор δ. Следует для запаса выбирать $S = 1{,}73 \div 1{,}75$, учитывая возможные отклонения действительной характеристики холостого хода от нормальной и некоторую приближенность равенства (14-71).

Если при $P_{н} \geqslant 12$ *Мвт* найденное значение $\delta < (0{,}45 \div 0{,}5)\, t_1$, то следует взять $\delta = (0{,}45 \div 0{,}5)\, t_1$ (ближе к $0{,}5 t_1$ при $P_{н} \geqslant 25$ *Мвт*), чтобы не получить большого увеличения поверхностных потерь в стали ротора из-за зубчатости статора. В небольших турбогенераторах ($P_{н} < 6$ *Мвт*) иногда приходится брать $\delta \approx$

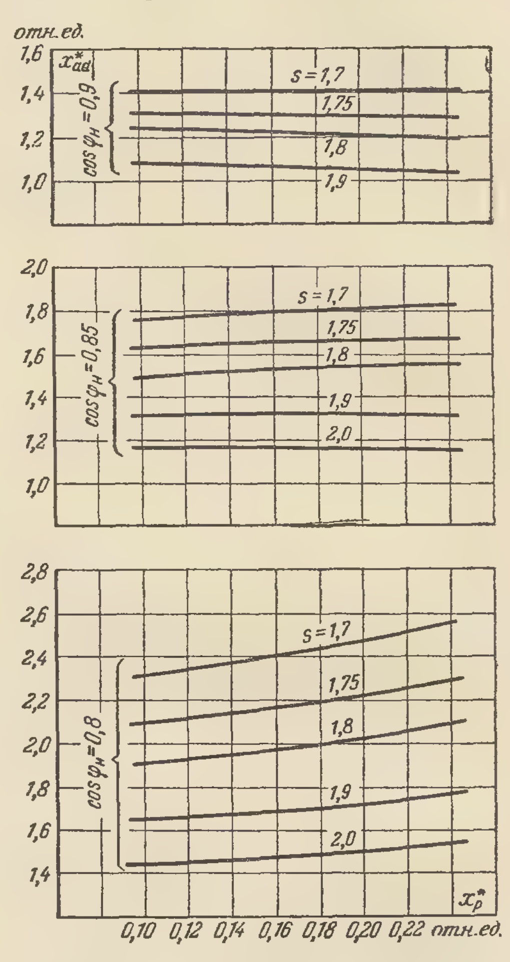


Рис. 14-24. Кривые $x^*_{ad} = f(x^*_{р})$ для различных значений S при $\cos\varphi_{н}$, равном 0,8; 0,85; 0,9.

$\approx (0{,}35 \div 0{,}40)\, t_1$. В больших турбогенераторах при $P_{н} = 50 \div 320$ *Мвт* $\delta = 4 \div 9$ *см* и $\delta > 0{,}5 t_1$.

14-6. ПОЛЮСЫ, ЗУБЦЫ, ЯРМО РОТОРА

а) **Явнополюсные машины.** Полюсы явнополюсных машин обычно собираются из листов, выштампованных по форме, соответствующей рис. 14-25 (см. также рис. 14-4). Для них наиболее часто применяет-

ся сталь Ст.3 толщиной 1—2 *мм* (чаще 1,5 *мм*).

На рис. 14-25 показаны способы крепления полюса к ярму (ободу) ротора. Для машин средней и большой мощности при относительно большом числе полюсов и при литом или сварном ободе ротора применяются болты, проходящие с внутренней стороны сквозь обод. Они ввертываются в стальной брус, помещенный в сердечнике полюса, или непосредственно в сердечник полюса, плотно спрессованный и имеющий со стороны, обращенной к ободу, резьбовые отверстия. При малых диаметрах ротора применяются винты, проходящие сквозь весь полюс. Они ввертываются в обод ротора. В этом случае следует брать винты с цилиндрической головкой, как показано пунктиром на рис. 14-25. При наборном ободе ротора полюсы укрепляются при помощи выступа, имеющего Т-образную форму или форму в виде ласточкина хвоста. Обычно выступ в виде ласточкина хвоста применяется только для машин небольшой и средней мощности при $2p$, равном 4 или 6. Для многополюсных машин, как правило, применяется Т-образный выступ.

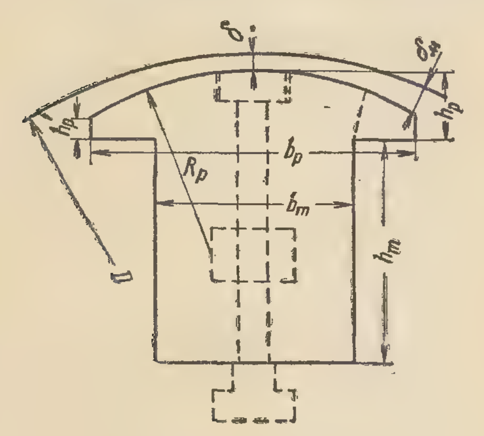


Рис. 14-25. Полюс при различных способах крепления его к ободу ротора.

Очертание полюсного наконечника выбирается при дуге радиусом R_p, значение которого зависит от b_p, δ и $\delta_м$ [см. (6-14)].

Длина полюса по оси l_m для небольших машин принимается равной длине статора l_1 (или на 1—2 *см* меньше); для машин средней мощности $l_m \approx l_1 - (2 \div 3)$ *см*; для крупных машин, в том числе и для гидрогенераторов, $l_m \approx l_1 - (5 \div 10$ *см*). Как правило, длина полюсного наконечника берется равной длине сердечника: $l_p = l_m$.

Ширина полюса b_m определяется по допустимой индукции в полюсе (в основании сердечника) B_m:

$$b_m = \frac{\Phi_н \sigma_н}{k_c l_m B_m}, \text{ см.} \qquad (14\text{-}73)$$

Здесь $\Phi_н$ — по (14-28); $k_c = 0{,}97$ при толщине стали 1,5 *мм*; B_m — по табл. 14-2; коэффициент рассеяния полюсов (предварительно)

$$\sigma_н \approx 1 + k_\sigma \frac{35\delta}{\tau^2}, \qquad (14\text{-}74)$$

где k_σ зависит главным образом от высоты полюсного наконечника h_p:

h_p, *см*	2	3	4	5	6	7
k_σ	5,5	7	8,5	10	11	12

(при $\alpha_p < 0{,}7$ значение k_σ брать меньше на 5—8%).

Высота полюсного наконечника h_p (рис. 14-25) для машин небольшой и средней мощности при $2p \leqslant 12$ рассчитывается по формуле

$$h_p = h'_p + R_p - \sqrt{R_p^2 - \left(\frac{b_p}{2}\right)^2}, \text{ см,} \qquad (14\text{-}75)$$

где размер $h'_p \approx 0{,}6 \div 2{,}0$ *см* [выбирается по конструктивным соображениям (механические напряжения от центробежных сил в наиболее опасном сечении полюсного наконечника, показанном на рис. 14-25 жирным пунктиром, не должны превышать допустимых), а при наличии успокоительной или пусковой клетки — также с учетом необходимости размещения на краях полюсного наконечника стержней этой клетки].

В предварительных расчетах для больших многополюсных машин при $\alpha_p = 0{,}70 \div 0{,}75$ можно принимать следующие значения h_p при наличии успокоительной клетки и при ее отсутствии (указаны в скобках):

τ, *см*	30—50	50—60	60—75
h_p, *см*	4,5—5,5(3—4)	5,5—6,5(4—5)	6,5—8,5(5—6,5)

Высоту полюсного сердечника h_m для небольших машин ($P_н < 50$ *квт*) при многослойной обмотке возбуждения предварительно можно найти по формуле

$$h_m \approx (0,3 \div 0,2)D - (h_p + \delta),\ см. \quad (14\text{-}76а)$$

Она дает ориентировочные значения h_m, которые возрастают вместе с τ и $2p$. Размер h_m может быть установлен только после расчета обмотки возбуждения при помощи масштабного эскиза катушки и полюса.

Для машин примерно 10—15-го габаритов при однослойной обмотке возбуждения и $2p \geqslant 6$ можно принять

$$h_m \approx 10,5\,\delta + 8,\ см. \quad (14\text{-}76б)$$

Для больших машин, в том числе и гидрогенераторов,

$$h_m = 0,9\,\tau - 0,0074\,\tau^2,\ см. \quad (14\text{-}76в)$$

Ярмо (обод) ротора в зависимости от размеров и скорости вращения машины представляет собой одну из следующих конструкций:

1) в небольших и быстроходных машинах — массивную или собранную из листов втулку цилиндрической или $2p$-гранной (с одной стороны) формы, непосредственно напрессованную на вал;

2) в средних и тихоходных машинах при $n_у = 1,2n_н$ — сварное или литое колесо со спицами и ступицей;

3) в больших гидрогенераторах — колесо, собранное из сегментов листовой стали.

Во многих случаях конструкция и размеры поперечного сечения обода ротора $S_р = h_{рот} l_{a2}$ определяются требованиями механической прочности и заданным маховым моментом; поэтому индукция $B_р$ в сечении $S_р$ часто получается сильно заниженной.

В тихоходных машинах сечение обода, выполняемого по п. 2, обычно определяется по допустимой индукции. В этом случае

$$l_{a2} \approx l_1 + (8 \div 15),\ см;$$

$$h_{рот} = \frac{\Phi_н \sigma_н}{2 l_{a2} B_р},\ см$$

($B_р$ из табл. 14-2). Но и здесь должна быть проверена прочность обода.

В дальнейшем при расчете обмотки возбуждения более точно устанавливаются размеры междуполюсного окна, а при этом и размеры h_m, b_m, l_m, l_{a2}, $h_р$.

б) **Турбогенераторы.** Размеры зубцов и ярма ротора турбогенератора выбираются с учетом механических напряжений, возникающих в них при скорости вращения $1,2n_н$ (3 600 *об/мин*). Здесь указываются принятые для роторов современных турбогенераторов размерные соотношения, которыми следует руководствоваться при проектировании ротора.

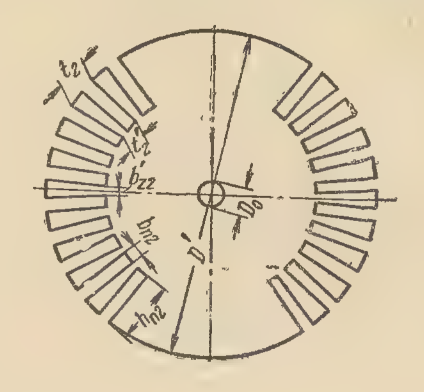


Рис. 14-26. К определению размеров ротора.

Внешний диаметр ротора

$$D' = D - 2\delta,\ см. \quad (14\text{-}77)$$

Длина ротора обычно больше длины статора

$$l_2 = l_1 + (5 \div 15),\ см \quad (14\text{-}78)$$

(добавка берется тем больше, чем больше $P_н$).

Турбогенераторы на мощности $P_н \geqslant 100$ *Мвт* выполняются также при $l_2 = l_1$.

На поверхности ротора выфрезеровываются пазы для укладки в них проводников обмотки возбуждения, при этом часть его полюсного деления оставляется без пазов и образует большой зубец (рис. 14-26).

Если обозначить через Z'_2 число пазовых делений, равных действительному пазовому делению, но рас-

пределенных по всей окружности ротора, то можно принять:

$$Z'_2 \approx (0{,}45 \div 0{,}55)\, D'. \quad (14\text{-}79)$$

Действительное число пазов ротора Z_2, в которые укладывается обмотка, определяется после выбора Z'_2 по соотношению

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2} = 0{,}66 \div 0{,}80. \quad (14\text{-}80)$$

Обычно $\gamma = 0{,}667 \div 0{,}75$. Число Z_2 должно быть кратным четырем.

В выполненных турбогенераторах наиболее часто встречаются следующие значения Z_2, Z'_2 и γ:

Z_2	16	20	24	28	28	32	36	36	40	40
Z'_2	24	28	32	38	42	42	46	50	52	54
γ	0,667	0,714	0,75	0,737	0,667	0,762	0,782	0,72	0,77	0,74

Размеры пазов, а следовательно, размеры узких зубцов и широкого зубца определяются в соответствии с приведенными далее соотношениями.

Глубина паза ротора с клином для машин с косвенным охлаждением $h_{п2} \approx (0{,}185 \div 0{,}170)\, D'$, *см*. Бо́льшие значения выбираются при $D \leqslant 70$ *см* (при $Z'_2 \leqslant 32$). При непосредственном водородном охлаждении проводников обмотки ротора $h_{п2} \approx (0{,}16 \div 0{,}145)\, D'$, *см*.

Пазовое деление по основаниям зубцов

$$t'_2 = \frac{\pi (D' - 2h_{п2})}{Z'_2}, \text{ см}. \quad (14\text{-}81)$$

Пазовое деление по сечениям зубцов на высоте их $0{,}2 h_{п2}$ от дна паза

$$t_{z0,2} = \frac{\pi D'_{z0,2}}{Z'_2}, \text{ см}, \quad (14\text{-}82)$$

где

$$D'_{z0,2} = D' - 1{,}6\, h_{п2}, \text{ см}. \quad (14\text{-}83)$$

Ширина паза

$$b_{п2} \approx \left(D'_{z\,0,2} - \frac{\Phi_н \sigma_н}{B_{z0,2}\, l_2} \right) \frac{1}{\Sigma c_ш}, \text{ см}, \quad (14\text{-}84)$$

где $\Phi_н$ — поток в зазоре, соответствующий э. д. с. $E_r = k_E U_н$; $\sigma_н \approx 1{,}05 \div 1{,}1$ (коэффициент рассеяния ротора); $B_{z0,2} \approx 19\,000 \div 22\,000$ *гс* (высшие значения для турбогенераторов типа ТВФ и ТВВ); $\Sigma c_ш$ — коэффициент из табл. 14-10 а (пояснения к определению $\Sigma c_ш$ приводятся в § 14-7).

Ширина паза $b_{п2}$ в выполненных машинах в зависимости от мощности имеет примерно следующие значения:

$b_{п2}$, *см*	2—2,2	2,3—2,5	2,6—2,8	3—3,3
$P_н$, *Мвт*	0,5—3	6—12	25—30	50—300

Одновременно с выбором $b_{п2}$ следует подобрать по табл. IV-5 ширину проводника обмотки возбуждения b_2 так, чтобы

$$b_{п2} = b_2 + 2\delta'_{и2}, \text{ см},$$

где $\delta_{и2}$ — толщина односторонней изоляции и защитной оболочки из белой жести (от голой меди до стенок паза); для машин с косвенным охлаждением $\delta'_{и2} = 0{,}16 \div 0{,}2$ *см* и для машин с непосредственным охлаждением проводников обмотки ротора $\delta_{и2} = 0{,}2$ *см* (см. рис. 14-43 и 14-46 и табл. 14-12а).

Следует также определить наименьшую ширину зубца (в его основании):

$$b'_{z2} = t'_2 - b_{п2}, \text{ см}. \quad (14\text{-}85)$$

По технологическим условиям b'_{z2} не должна быть меньше 1,2 *см* при $D' \geqslant 80$ *см* и 0,9—0,8 *см* при $D' \leqslant 70$ *см*.

В дальнейшем при расчете обмотки возбуждения и определении числа проводников в пазу, их высоты a_2, изоляции паза, высоты клина окончательно устанавливаются размеры $h_{п2}$ и $b_{п2}$ (см. § 14-8).

Высота пазового клина $h_{к2} \approx (0{,}9 \div 1{,}1)\, b_{п2}$. При $P_н \geqslant 6$ *Мвт* обычно клин выполняется из дюра-

Таблица 14-10а

Значения $\Sigma c_ш$

z'_2	$Z_2=16$	z'_2	$Z_2=20$	z'_2	$Z_2=24$	z'_2	Z_2	
							24	28
20	4,42	25	5,51	30	6,61	35	5,87	7,71
21	4,26	26	5,35	31	6,45	36	5,74	7,55
22	4,11	27	5,20	32	6,30	37	5,61	7,40
23	3,97	28	5,06	33	6,15	38		7,25
24	3,83	29	4,92	34	6,01			
		30	4,78					

z'_2	Z_2		z'_2	Z_2			z'_2	Z_2		
	28	32		28	32	36		32	36	40
39	7,10	8,97	44	6,44	8,20	10,07	49	7,52	9,29	11,17
40	6,96	8,81	45	6,32	8,05	9,91	50	7,39	9,15	11,00
41	6,82	8,65	46		7,91	9,75	51		8,99	10,85
42	6,69	8,49	47		7,78	9,59	52		8,84	10,69
43	6,56	8,34	48		7,64	9,44				

z'_2	Z_2		z'_2	$Z_2=40$
	36	40		
53	8,72	10,54	58	9,82
54	8,60	10,39	59	9,69
55	8,48	10,24	60	9,55
56	8,30	10,10	61	9,43
57	8,18	9,96	62	9,30

люминия; при $P_н<6$ *Мвт* клин делается составным из стали и бронзы, что соответствует уменьшению открытия паза и, следовательно, приводит к уменьшению поверхностных потерь в зубцах статора.

При определении сечения ярма ротора следует учесть диаметр центрального отверстия D_0, если оно не заполняется стальным стержнем. Такое отверстие делается во всех роторах современных турбогенераторов. Оно необходимо для устранения неравномерности распределения внутренних напряжений вблизи центральной линии, возникающих в поковке ротора при ее изготовлении, и главным образом для того, чтобы можно было осуществить контроль качества поковки ротора путем осмотра ее центральных частей.

Обычно размер D_0 в зависимости от диаметра ротора D' имеет следующие значения:

D_0, *см*	3,0—4,0	5,0	7,0—8,0	11,0—12,0
D', *см*	45—60	70	80—90	100—115

14-7. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

а) **Явнополюсные машины.** Построение характеристики холостого хода явнополюсной синхронной машины производится по данным расчета ее магнитной цепи (гл. 6; см. также пример расчета в конце данной главы).

При расчете магнитной цепи больших машин расчетную длину статора l_δ следует определить более точным методом. При этом

$$l_\delta = \frac{l'_р + l'_1}{2} - b'_в n_в, \ см. \quad (14\text{-}86)$$

Приведенные здесь величины $l'_р$, l'_1 и

$b'_в$ определяются следующим образом.

Если $l_р \geqslant l_1$, то

$$l'_р = l_р, \ см; \qquad (14\text{-}87)$$

если $l_р < l_1$, то

$$l'_р = l_р + 2l_{р.щ} \frac{\delta}{\delta_щ}, \ см. \qquad (14\text{-}88)$$

Размеры $l_{р.щ}$ и $\delta_щ$ указаны на рис. 14-27, где изображено также

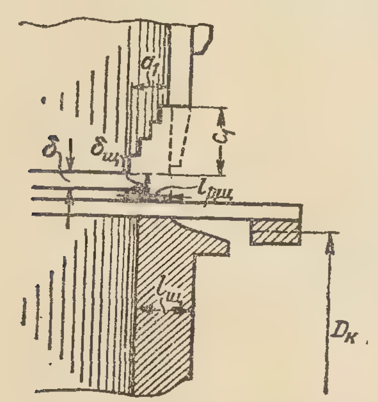


Рис. 14-27. К определению расчетной длины l_δ.

ступенчатое расположение листов крайних пакетов статора, которое делается в больших машинах для уменьшения потерь от вихревых токов и механических напряжений в нажимных пальцах.

Длина l'_1 находится по формуле

$$l'_1 = l_1 - 2a_1 + \frac{a_1 \delta}{\frac{c_1}{2} + \delta}, \ см \qquad (14\text{-}89)$$

[размеры a_1 и c_1 указаны на рис. 14-27; обычно $a_1 = l_{пак}$ и $c_1 = (0{,}7 \div 0{,}9) h_{п1}$].

Величина $b'_в$ находится по рис. 14-28, где $b'_в$ представлена как функция δ при ширине канала $b_в = 1$ *см*.

При определении площади сердечника полюса крупных машин следует учитывать толщину нажимных щек и брать его расчетную длину

$$l'_m = l_m + l_щ, \ см. \qquad (14\text{-}90)$$

Здесь взято не $2l_щ$, а $l_щ$, чтобы приближенно учесть закругления краев щеки и углубления в ней для гаек стяжных шпилек. Обычно для гидрогенераторов $l_щ = 4{,}5 \div 6{,}0$ *см*.

Характеристики холостого хода современных крупных синхронных машин, в том числе и гидрогенераторов, построенные в относительных единицах, мало отличаются от нормальной характеристики холостого хода, представленной на рис. 14-23.

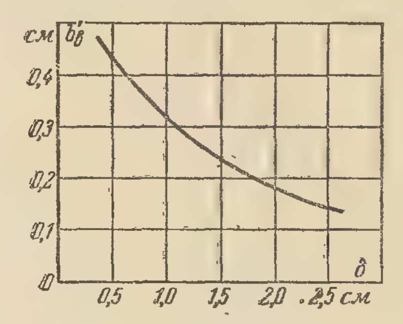


Рис. 14-28. К определению расчетной длины l_δ.

б) **Турбогенераторы.** Характеристика холостого хода турбогенератора, так же как и других электрических машин, строится по данным расчета его магнитной цепи (рис. 14-29). При этом для различных значений потока в зазоре Φ определяется н. с. обмотки возбуждения $F_в$, равная сумме магнитных напряжений зазора, зубцов и ярма статора, зубцов и ярма ротора:

$$F_в = F_\delta + F_{z1} + F_с + F_{z2} + F_р, \ а. \qquad (14\text{-}91)$$

Магнитное напряжение зазора (на два полюса)

$$F_\delta = 1{,}6 k_\delta \delta B_\delta = C_5 B_\delta, \ а. \qquad (14\text{-}92)$$

Индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{1}{S_\delta} \Phi = C_2 \Phi, \ гс. \qquad (14\text{-}93)$$

Поток в зазоре

$$\Phi = \frac{10^8}{4{,}44 f w_1 k_{о1}} E_0 = C_1 E_0, \ мкс. \qquad (14\text{-}94)$$

Расчетное сечение зазора

$$S_\delta = k_\gamma \frac{2}{\pi} \frac{\pi (D - \delta)}{2} (l_1 + 2\delta) =$$

$$= k_\gamma (D - \delta)(l_1 + 2\delta), \ см^2, \qquad (14\text{-}95)$$

где

$$k_\gamma = (1 - 0{,}5\gamma) \frac{\pi}{2}. \qquad (14\text{-}96)$$

Коэффициент зазора

$$k_\delta = k_{\delta z} + (k_{\delta в} - 1) + (k_{\delta р} - 1) + (k_{\delta\Delta} - 1) + (k_{\delta\gamma} - 1) + (k_{\delta c} - 1), \qquad (14\text{-}97)$$

где коэффициент, учитывающий зубчатость статора,

$$k_{\delta z} = 1 + \frac{b_{п1}^2}{t_1(5\delta + b_{п1}) - b_{п1}^2}; \qquad (14\text{-}98)$$

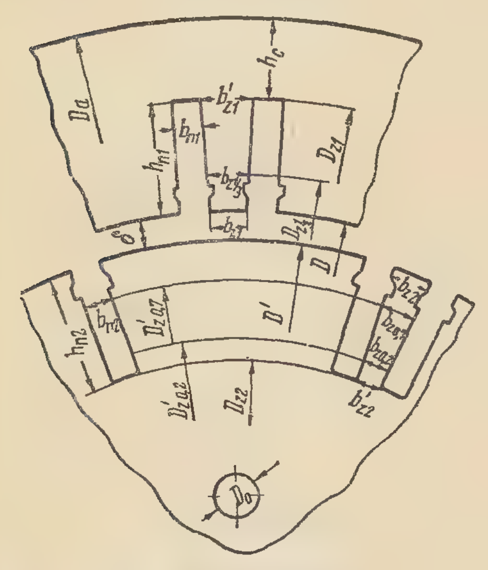


Рис. 14-29. К расчету магнитной цепи турбогенератора.

коэффициент, учитывающий радиальные вентиляционные каналы статора,

$$k_{\delta в} = 1 + \frac{b_в^2}{(l' + b_в)(5\delta + b_в) - b_в^2}; \qquad (14\text{-}99)$$

коэффициент, учитывающий рифление поверхности ротора (делается для увеличения теплоотдачи, рис. 14-30),

$$k_{\delta р} = 1 + \frac{b_р^2}{t_р(5\delta + b_р) - b_р^2}; \qquad (14\text{-}100)$$

коэффициент, учитывающий «срезы» зубцов ротора перед отверстиями в клиньях пазов для входа и выхода водорода (только для ротора при непосредственном охлаждении его обмотки, рис. 14-31),

$$k_{\delta\Delta} \approx 1 + 0{,}025\frac{\gamma}{\delta}; \qquad (14\text{-}101)$$

коэффициент, учитывающий зубчатость ротора,

$$k_{\delta\gamma} = 1 + \frac{b_{п2}^2}{t_2(5\delta + b_{п2}) - b_{п2}^2}\frac{\gamma}{2} \qquad (14\text{-}102)$$

[при составном клине (применяется при $P_н < 6$ *Мвт*) вместо $b_{п2}$ надо поставить $0{,}5 b_{п2}$];

коэффициент, учитывающий ступенчатость крайних пакетов статора,

$$k_{\delta c} \approx 1 + \frac{0{,}5}{\sqrt{\delta l_{ср}}} \qquad (14\text{-}103)$$

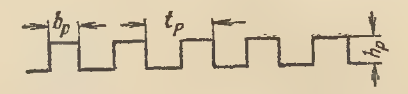


Рис. 14-30. Рифление бочки ротора (при нормальном рифлении: $b_р = 6$ *мм*; $t_р = 12$ *мм*; $h_р = 5$ *мм*).

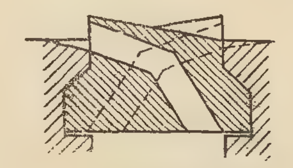


Рис. 14-31. К определению $k_{\delta\Delta}$.

при

$$l_{ср} = 0{,}5(l_1 + l_2), \text{ см}. \qquad (14\text{-}104)$$

Магнитное напряжение зубцов статора

$$F_{z1} = 2h_{п1} H_{z\frac{1}{3}}, \text{ а}, \qquad (14\text{-}105)$$

где $h_{п1}$ — глубина паза (или высота зубца); $H_{z\frac{1}{3}}$ — напряженность поля в сечении зубца на 1/3 высоты от его коронки, соответствующая индукции $B_{z\frac{1}{3}}$ в этом сечении. Индукция

$$B_{z\frac{1}{3}} = \frac{1}{\frac{2}{\pi} 3q_1 b_{z\frac{1}{3}} l k_c}\Phi = C_3\Phi, \text{ гс}, \qquad (14\text{-}106)$$

где

$$b_{z\frac{1}{3}} = t_{\frac{1}{3}} - b_{п1}, \text{ см} \qquad (14\text{-}107)$$

при пазовом делении

$$t_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3} h_{\text{п}1}\right)}{Z_1}, \; см. \quad (14\text{-}108)$$

Напряженность поля $H_{z\frac{1}{3}}$ определяется при $B_{z\frac{1}{3}} \leqslant 18\,000$ *гс*, то табл. II-3. Если $B_{z\frac{1}{3}} > 18\,000$ *гс*, то следует учесть ответвление потока в паз. В этом случае рассчитываются коэффициент

$$k_{\text{п}\frac{1}{3}} = \frac{t_{\frac{1}{3}} l_1}{b_{z\frac{1}{3}} l k_{\text{c}}} - 1. \quad (14\text{-}109)$$

и расчетная индукция $B_{z\frac{1}{3}}$ по (14-106). Зная $B_{z\frac{1}{3}}$ и $k_{\text{п}\frac{1}{3}}$, по кривым рис. II-3 определяем соответствующую им $H_{z\frac{1}{3}}$ (приближенно также и для Э330).

Магнитное напряжение ярма статора

$$F_{\text{c}} = l_{\text{c}} H_{\text{c}}, \; a, \quad (14\text{-}110)$$

где расчетная длина магнитных линий

$$l_{\text{c}} = \gamma \frac{\pi (D_a - h_{\text{c}})}{2}, \; см; \quad (14\text{-}111)$$

H_{c} — напряженность поля, которая определяется по табл. II-3 или II-4 для индукции

$$B_{\text{c}} = \frac{18 - 10\gamma}{18 - 9\gamma} \frac{1}{2h_{\text{c}} l k_{\text{c}}} \Phi = C_4 \Phi, \; гс. \quad (14\text{-}112)$$

Магнитные напряжения зубцов F_{z2} и ярма $F_{\text{р}}$ ротора могут быть определены путем расчета магнитных характеристик для необмотанной и обмотанной частей ротора, построения при их использовании кривых поля в зазоре для различных значений н. с. возбуждения и разложения этих кривых на гармонические [Л. 14, 2, 112]. Такой метод требует кропотливых расчетов, отнимает много времени и поэтому на практике применяется редко.

Мы приведем здесь приближенный метод определения F_{z2} и $F_{\text{р}}$, разработанный и применяемый на заводе «Электросила» [Л. 112]. Он основан на приведении магнитной цепи неявнополюсной машины с распределенной обмоткой возбуждения к примерно эквивалентной магнитной цепи явнополюсной машины с сосредоточенной обмоткой возбуждения.

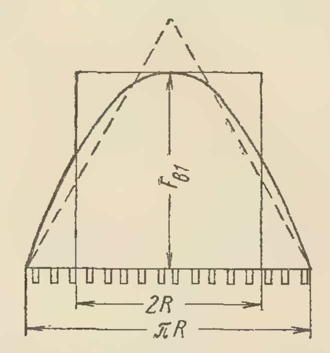


Рис. 14-32. Замена распределенной н. с. сосредоточенной (площадь треугольника равна площади, ограниченной синусоидой).

Распределенная н. с. заменяется сосредоточенной таким образом, чтобы площадь прямоугольника, соответствующего сосредоточенной н. с., была равна площади треугольника, соответствующего распределенной н. с., или площади, ограниченной синусоидой и осью абсцисс (рис. 14-32).

В этом случае основание прямоугольника найдем из равенства площадей $\frac{2}{\pi} F_{\text{в}1} \pi R = F_{\text{в}1} x$, откуда $x = 2R$, т. е. диаметру ротора при $2p = 2$, который можно рассматривать как проекцию полуокружности ротора на его поперечную ось.

Таким образом, при полностью обмотанном роторе можно с некоторым приближением при приведении его к эквивалентному ротору с сосредоточенной обмоткой взять для эквивалентного сечения стали разность между диаметром ротора и суммой проекций на него ширины пазов, умноженную на длину ротора.

Так как в действительности пазы, расположенные на полюсном делении ротора, занимают только часть его, то сумма проекций шири-

ны пазов на поперечную ось будет равна (рис. 14-33):

$$b_{п2}\,\Sigma\,c_{ш} = b_{п2}\,\frac{1-\cos\gamma\,\dfrac{\pi}{2}}{\sin\dfrac{\pi}{Z_2'}},\ см \quad (14\text{-}113)$$

(значения $\Sigma c_{ш}$ для различных Z_2' и $\gamma = Z_2/Z_2'$ приведены в табл. 14-10а).

Для определения F_{z2} и $F_р$ необходимо вначале найти поток рассеяния ротора

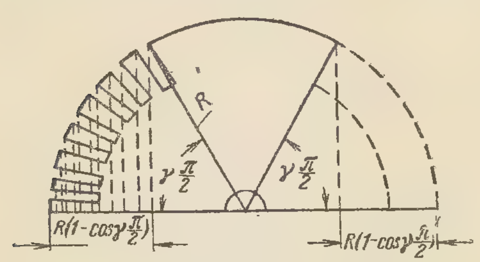


Рис. 14-33. К определению эквивалентного сечения стали ротора.

$$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma п} + \Phi_{\sigma к} = C_б F_1 + \Phi_{\sigma к},\ мкс. \quad (14\text{-}114)$$

Пазовый поток рассеяния ротора

$$\Phi_{\sigma п} = 0{,}5\Lambda_{2п} F_1 = C_б F_1,\ мкс, \quad (14\text{-}115)$$

где

$$F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_с,\ а; \quad (14\text{-}116)$$

расчетная магнитная проводимость пазового потока рассеяния ротора

$$\Lambda_{2п} \approx 10\,\frac{l_2}{Z_2}\left(\frac{h_{п2}-h_{к2}}{2b_{п2}} + 0{,}5\right) \quad (14\text{-}117)$$

при сплошных немагнитных клиньях в пазах;

$$\Lambda_{2п} \approx 10\,\frac{l_2}{Z_2}\left(\frac{h_{п2}-h_{к2}}{2b_{п2}} + 1{,}5\right) \quad (14\text{-}118)$$

при составных клиньях в пазах (турбогенераторы при $P_н < 6$ *Мвт*).

Поток рассеяния ротора через кольцевые бандажи (рис. 14-34)

$$\Phi_{\sigma к} \approx \frac{D_{к1}^2 - D_{к2}^2}{2}\cdot 25\,000\ мкс \quad (14\text{-}119)$$

при магнитных бандажах, насаженных на бочку ротора (только для небольших турбогенераторов — примерно до 1,5 *Мвт*);

$$\Phi_{\sigma к} \approx 1{,}2\,\frac{D_{к1}-D_{к2}}{l_1}\,\frac{\delta}{\delta_1}\,\Phi,\ мкс \quad (14\text{-}120)$$

при магнитных бандажах, отставленных от бочки ротора на δ_1 *см* ($\delta_1 \approx 1{,}0 \div 2{,}0$ *см* для $P_н \leqslant 12$ *Мвт*, рис. 14-34); $\Phi_{\sigma к} = 0$ при немагнитных бандажах (для $P_н \geqslant 25$ *Мвт*, а также для $P_н \leqslant 12$ *Мвт*, если бандажные кольца выполняются из дюралюминия).

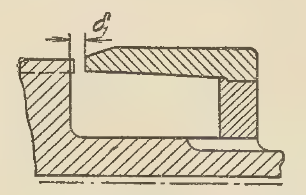


Рис. 14-34. Бандажное кольцо, отставленное от бочки ротора.

Размеры $D_{к2}$ и $D_{к1}$ (рис. 14-7) можно определить по формулам:

$$D_{к2} \approx D' - 2(h_{к2} + \delta_{и.к} + \delta_{и.б}),\ см; \quad (14\text{-}121)$$

$$D_{к1} = D_{к2} + 2h_б,\ см, \quad (14\text{-}122)$$

где $\delta_{и.к}$ — толщина прокладок (изоляционных и других) под клином; $\delta_{и.б}$ — толщина подбандажной изоляции; $h_б$ — средняя толщина кольцевого бандажа; для машин Т и ТВ $\delta_{и.к} \approx 0{,}65 \div 0{,}85$ *см*; для машин ТВФ и ТВВ $\delta_{и.к} = 0{,}9 \div 1{,}1$ *см*; $\delta_{и.б} = 0{,}45 \div 0{,}60$ *см*; $h_б$ — из кривой рис. 14-35 в зависимости от диаметра D'.

Теперь можно найти поток ротора:

$$\Phi_2 = \Phi + \Phi_\sigma,\ мкс. \quad (14\text{-}123)$$

По потоку Φ_2 определяются индукции в отдельных сечениях зубцов и ярма ротора.

Магнитное напряжение зубцов ротора рассчитывается отдельно для каждой половины высоты зубца $h_{п2}$ по индукциям в сечениях зубцов для одной половины на высоте $0{,}7h_{п2}$ и для другой на высоте $0{,}2h_{п2}$ от основания зубца.

Эти сечения определяются по следующим формулам [см. (14-113)]:

$$S_{z\,0,7} = \left(D_{0,7}' - b_{п2}\,\Sigma\,c_{ш}\right) l_2 = \left(D_{0,7}' - b_{п2}\,\frac{1-\cos\gamma\,\dfrac{\pi}{2}}{\sin\dfrac{\pi}{Z_2'}}\right) l_2,\ см^2. \quad (14\text{-}124)$$

$$S_{z\,0,2} = \left(D'_{0,2} - b_{п2}\,\Sigma c_{ш}\right) l_2 = \left(D'_{0,2} - b_{п2}\frac{1 - \cos\gamma\,\dfrac{\pi}{2}}{\sin\dfrac{\pi}{Z'_2}}\right) l_2,\ см^2, \quad (14\text{-}125)$$

где

$$D'_{0,7} = D' - 0{,}6h_{п2},\ см; \quad (14\text{-}126)$$

$$D'_{0,2} = D' - 1{,}6h_{п2},\ см; \quad (14\text{-}127)$$

$\Sigma c_{ш}$ — из табл. 14-10а.

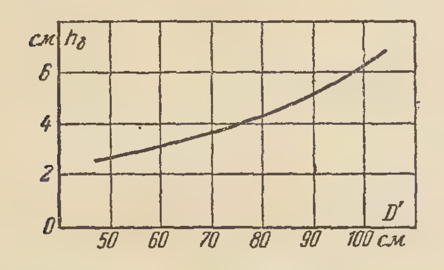


Рис. 14-35. Средняя толщина кольцевого бандажа (по данным выполненных машин).

Индукции в указанных сечениях зубцов:

$$B_{z\,0,7} = \frac{1}{S_{z\,0,7}}\Phi_2 = C_7\Phi_2,\ гс; \quad (14\text{-}128)$$

$$B_{z\,0,2} = \frac{1}{S_{z\,0,2}}\Phi_2 = C_8\Phi_2,\ гс. \quad (14\text{-}129)$$

Если $B_{z\,0,7}$ или $B_{z\,0,2} \leqslant 18\,000$ *гс*, то можно считать, что поток проходит только через зубцы; тогда соответствующие напряженности поля $H_{z\,0,7}$ и $H_{z\,0,2}$ находим по табл. II-8 или II-9.

Если $B_{z\,0,7}$ или $B_{z\,0,2}$ больше 18 000 *гс*, то следует учесть ответвление потока в пазы при помощи коэффициентов:

$$k_{п\,0,7} = \frac{b_{п2}}{b_{z\,0,7}}; \quad (14\text{-}130)$$

$$k_{п\,0,2} = \frac{b_{п2}}{b_{z\,0,2}}. \quad (14\text{-}131)$$

Здесь

$$b_{z\,0,7} = \frac{\pi D'_{0,7}}{Z'_2} - b_{п2},\ см; \quad (14\text{-}132)$$

$$b_{z\,0,2} = \frac{\pi D'_{0,2}}{Z'_2} - b_{п2},\ см. \quad (14\text{-}133)$$

В этом случае $H_{z\,0,7}$ и $H_{z\,0,2}$ находим по кривым рис. II-5 или II-6 для $B_{z\,0,7}$ и $B_{z\,0,2}$ и соответствующих значений $k_{п\,0,7}$ и $k_{п\,0,2}$.

Следовательно, получим (на два полюса):

$$F_{z2} = F_{z\,0,7} + F_{z\,0,2},\ а, \quad (14\text{-}134)$$

где

$$F_{z\,0,7} = h_{п2}H_{z\,0,7},\ а; \quad (14\text{-}135)$$

$$F_{z\,0,2} = h_{п2}H_{z\,0,7},\ а. \quad (14\text{-}136)$$

Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_р = l_р H_р,\ а. \quad (14\text{-}137)$$

Напряженность поля $H_р$ находится по табл. II-8 или II-9 для индукции

$$B_р = \frac{1}{S_р}\Phi_2 = C_9\Phi_2,\ гс, \quad (14\text{-}137а)$$

где

$$S_р = \left(D' - 2h_{п2} - D_0\right) l_2,\ см^2. \quad (14\text{-}138)$$

Средняя длина магнитных линий в ярме ротора

$$l_р \approx (D' - 2h_{п2}),\ см. \quad (14\text{-}139)$$

Данные расчета магнитных напряжений и н. с. $F_в$ для различных значений э. д. с. E_0 и потока Φ следует свести в табл. 14-11 а. Коэффициенты пропорциональности этой таблицы C_1—C_9 должны быть заменены при расчете конкретной машины их численными значениями согласно ранее приведенным формулам.

По данным табл. 14-11а производится построение характеристики холостого хода. Рекомендуется сравнить ее с нормальной характеристикой, данные которой приведены в таблице к рис. 14-23. Характеристики холостого хода современных турбогенераторов в части, соответствующей насыщению, располагаются обычно ниже нормальной характеристики холостого хода.

Таблица 14-11а

Данные расчета характеристики холостого хода

E_0^*, отн. ед	0,5	1	1,1	1,2	1,3
E_0, *в*					
$\Phi = C_1 E_0$, *мкс*					
$B_\delta = C_2 \Phi$, *гс*					
$B_{z\frac{1}{3}} = C_3 \Phi$, *гс*					
$B_c = C_4 \Phi$, *гс*					
$H_{z\frac{1}{3}}$, *а/см*					
H_c, *а/см*					
$F_\delta = C_5 B_\delta$, *а*					
$F_{z1} = 2h_{п1} H_{z\frac{1}{3}}$, *а*					
$F_c = l_c H_c$, *а*					
$F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_c$, *а*					
$\Phi_\sigma = C_6 F_1 + \Phi_{\sigma к}$, *мкс*					
$\Phi_2 = \Phi + \Phi_\sigma$, *мкс*					
$B_{z0,7} = C_7 \Phi_2$, *гс*					
$B_{z0,2} = C_8 \Phi_2$, *гс*					
$B_p = C_9 \Phi_2$, *гс*					
$H_{z0,7}$, *а/см*					
$H_{z0,2}$, *а/см*					
H_p, *а/см*					
$F_{z0,7} = h_{п2} H_{z0,7}$, *а*					
$F_{z0,2} = h_{п2} H_{z0,2}$, *а*					
$F_p = l_p H_p$, *а*					
$F_в = F_1 + F_{z2} + F_p$, *а*					
$F_в^*$, отн. ед.					

14-8. ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

а) **Явнополюсные машины.** При определении числа витков и размеров проводника обмотки возбуждения прежде всего необходимо найти ее н. с. $F_{в.н}$ при номинальной нагрузке.

Обратимся вначале к явнополюсной машине. Для нее н. с. $F_{в.н}$ находится при помощи диаграммы Блонделя и частичных магнитных характеристик или (приближенно) при помощи диаграммы Потье (§ 6-8, п. 2).

После определения $F_{в.н}$ предварительно определяется сечение проводника обмотки возбуждения

$$s_в = 1{,}15 \frac{\rho_t \, p F_{в.н} \, l_{в.ср}}{U'_в}, \ мм^2. \qquad (14\text{-}140)$$

Здесь ρ_t — удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки $t°$ С, которое следует принять: $\rho_{100} = 0{,}0236$ для многослойной обмотки из изолированных медных проводников при изоляции класса А; $\rho_{120} = 0{,}025$ для такой же обмотки при изоляции класса В; $\sigma_{130} = 0{,}0256$ при однослойной обмотке из голой полосовой меди и изоляции класса В. Коэффициент 1,15 взят для запаса (§ 6-8, п. 2).

Среднюю длину витка $l_{в.ср}$ для машин мощностью примерно до 50 *квт* при многослойной обмотке возбуждения можно предварительно найти по формуле

$$l_{в.ср} \approx [2(l_m + b_m) + (6 \div 16)] \, 10^{-2}, \ м. \qquad (14\text{-}141)$$

Размеры l_m и b_m должны быть взяты в сантиметрах, так же как и добавка (6-16), которая берется тем больше, чем больше $P_н$ и τ.

Напряжения $U_в$ возбудителя обычно равны 230, 115, 100, 80, 50, 35 или 24 *в*; напряжения на кольцах $U'_в$ на 1—3 *в* меньше. Для небольших машин при применении для возбуждения полупроводниковых выпрямителей можно взять $U'_в < 24$ *в*.

Определив по (14-140) сечение проводника $s_в$, находим ток возбуждения

$$I_в = s_в \Delta_в, \ а, \qquad (14\text{-}142)$$

где плотность тока $\Delta_в = 1{,}8 \div 2{,}7$ *а/мм²* для многослойных обмоток из изолированных проводников; $\Delta_в$ зависит от выполнения обмотки, класса изоляции, τ и отношения l_1/τ; для коротких машин при больших значениях τ и классе изоляции В (F, H) можно брать высшие значения.

Далее определяются размеры $d/d_{из}$ при круглых проводниках или $a \times b / a_{из} \times b_{из}$ при прямоугольных проводниках (обычно ПЭЛБО и ПБД при классе изоляции А или ПСД при классе изоляции В). Указанные размеры должны быть вы-

браны по стандарту (приложение IV).

При выборе размеров сечения приходится учитывать ряд обстоятельств.

Для небольших машин при $2p \leqslant 8$ рекомендуется по возможности применять обмотку из изолированного проводника прямоугольного сечения. По технологическим условиям сечение проводника при прямоугольных сечениях полюсного сердечника должно быть не более 30—40 *мм*², причем отношение сторон сечения проводника $b:a$ рекомендуется выбирать в пределах 1,5—2 (намотка может быть на широкую или на узкую сторону).

Если при выбранном напряжении $U'_в$ сечение проводника, рассчитанное по (14-140), получится меньше 5—6 *мм*², то следует взять более низкое напряжение, так как при $s_в = 5 \div 6$ *мм*² заполнение объема катушки медью и ее теплоотдача заметно ухудшаются. Еще более резко ухудшаются указанные условия, если применяется круглый проводник (при $s_в < 2,5 \div 3$ *мм*²). Следует отметить, что вообще мощность малых машин при данных размерах в большой степени ограничивается нагревом обмотки возбуждения, особенно при $2p=4$.

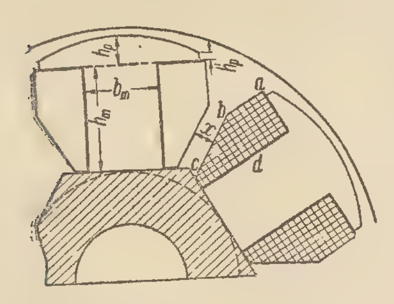


Рис. 14-36. Эскиз полюсов и катушек многослойной обмотки возбуждения.

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$w_в = \frac{F_{в.н}}{2I_в}. \qquad (14\text{-}143)$$

Определение размеров катушки, а при этом более точных размеров h_m и $l_{в.ср}$ производится при помощи масштабного эскиза вида, представленного на рис. 14-36; здесь размер x (расстояние между катушками в их нижней части) не следует брать меньше 1,4—1,8 *см*.

После того как определены размеры катушки вместе с ее изоляцией (§ 5-3, табл. 5-6), следует рассчитать превышение температуры обмотки возбуждения [Л. 109]:

$$\Theta_в = \frac{\left(2,8+\frac{l_1}{\tau}\right) F_{в.н}\Delta_в}{76\Pi_в\left(1,6+\sqrt{v_р}\right)} \times \left[1+\frac{\delta_{и.п}(m-0,5)\left(1,6+\sqrt{v_р}\right)}{2,8+\frac{l_1}{\tau}}\right], \ ^\circ C, \qquad (14\text{-}144)$$

где $\Pi_в$ — боковой периметр катушки abc, *см* (рис. 14-36);
$\delta_{и.п}$ — двусторонняя изоляция проводника, *см*;
m — число слоев в катушке в наиболее широкой ее части (db на рис. 14-36);
$v_р$ — окружная скорость ротора, *м/сек*.

Если превышение температуры окажется более 60° С при изоляции класса А или более 80° С при изоляции класса В, то необходимо изменить размеры (рекомендуется для теплового запаса иметь $\Theta_в$ на 10—15% ниже указанных предельных значений).

Как отмечалось, для машин при $P_н \geqslant 100$ *квт* применяется однослойная обмотка возбуждения из проводника в виде полосовой меди, намотанной на ребро. В этом случае целесообразно вначале найти ширину проводника b (рис. 14-37) по формуле

$$b = 5\left[\frac{\pi(D-2\delta-2h_р-2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2\cdot 0,1 - x\right], \ мм, \qquad (14\text{-}145)$$

где $\delta_1 = 0,2 \div 0,3$ *см*; в крупных гидрогенераторах $\delta_1 = 0,4$ *см* (толщина изоляции между катушкой и сердечником полюса);

0,1 *см* — воздушный промежуток между катушкой и сердечником полюса (для больших машин);

x — минимальное расстояние между катушками соседних полюсов, при этом должно быть

$$x \geqslant \frac{0{,}01 l_1 \tau}{h_m} + 1{,}3, \ см; \quad (14\text{-}146)$$

для крупных гидрогенераторов $x \geqslant \geqslant 4$ *см*.

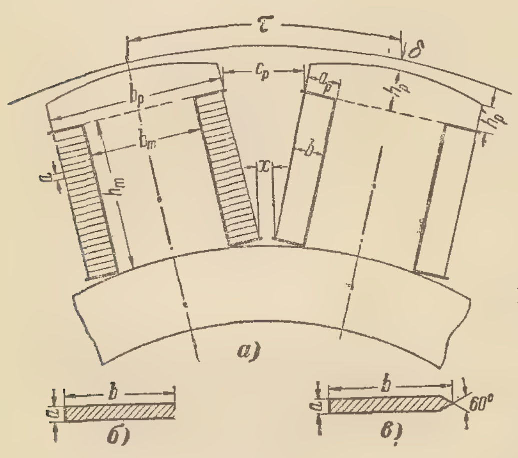


Рис. 14-37. Эскиз полюсов и катушек однослойной обмотки возбуждения и сечения полосовой меди.

По стандарту (приложение IV) надо взять ширину проводника b, ближайшую к полученной по (14-145), и высоту его a, чтобы $a \times \times b \approx s_в$ по (14-140), где $l_{в.ср}$ можно определить по (14-150) или (14-151) при предварительно выбранных размерах b_m и l_m.

Затем определяется плотность тока

$$\Delta_в = 20 \sqrt{\frac{\Theta_в \alpha k}{b}}, \ а/мм^2, \quad (14\text{-}147)$$

где α и k берутся из кривых рис. 14-38; здесь рекомендуется при изоляции класса В с учетом теплового запаса принять $\Theta_в \approx 80°$ С.

Теперь можно определить ток возбуждения $I_в$ по (14-142) и число витков на полюс $w_в$ по (14-143).

Если при стандартном напряжении возбудителя (115 и 230 *в*) сечение проводника по (14-140) получается меньше 35—40 $мм^2$ и напряжение возбудителя не предписывается заданием, то следует перейти к низшим нестандартным напряжениям.

Если в крупных машинах при $U_в = 230$ *в* сечение проводника получается больше примерно 800 $мм^2$, то

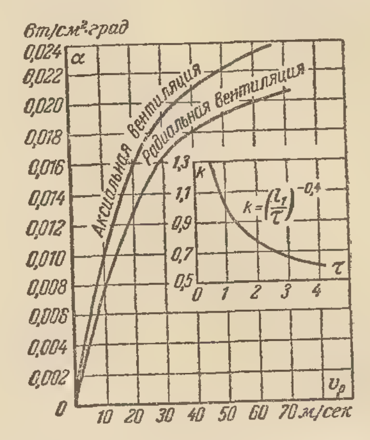


Рис. 14-38. К определению плотности тока $\Delta_в$ и превышения температуры $\Theta_в$ однослойной обмотки возбуждения.

нужно принять любое подходящее напряжение возбудителя, по возможности не выше 400 *в* (для очень крупных гидрогенераторов до 500—600 *в*). Во всех случаях при $s_в > > 300$ $мм^2$ выгодно применить полосовую медь с профилем по рис. 14-37, *в*, обеспечивающим лучшую теплоотдачу обмотки. Однако теплоотдача при этом увеличивается непропорционально увеличению боковой поверхности катушки из-за неравномерности обдува ее воздухом, движение которого в основном происходит в радиальном направлении. Можно считать, что она увеличивается в среднем в 1,3—1,4 раза по сравнению с профилем меди по рис. 14-37, *б*.

В последние годы для обмоток возбуждения крупных гидрогенераторов применяется полосовая медь, имеющая специальный «технологический» профиль, показанный на рис. 14-39. При таком профиле становится ненужной операция снятия наплывов в местах закругления витков, что приходится делать при профиле меди по рис. 14-37, *б* и *в* и что повышает трудоемкость изготовления катушек.

Указанные профили меди по рис. 14-37, *в* и 14-39 не имеют стандартных размеров и поставляются кабельным заводом по согласованным техническим условиям на медные шины.

При выборе размеров меди по рис. 14-39 следует придерживаться

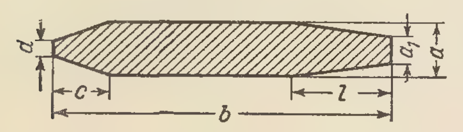


Рис. 14-39. Специальный «технологический» профиль меди для роторных катушек крупных гидрогенераторов ($c=8$ *мм*; $d=2$ *мм*; $l\approx 0{,}4\,b$; $a_1\approx 0{,}915\,a$ для однорадиусных и $a_1\approx 0{,}85\,a$ для двухрадиусных катушек; радиус закругления витков не менее 80 *мм*).

следующих условий: $6<a<15$ и $b/a\leqslant 15$. Сечение меди $s_в$ определяется путем сложения площадей прямоугольника и двух трапеций. Оно должно быть близко к сечению $s_в$ по (14-140), где $l_{в.ср}$ можно предварительно определить при выбранных размерах b_m и l_m по приведенной ниже формуле (14-150) или (14-151).

Далее определяются высота собранной катушки

$$h_{кат}=0{,}1\,(a+\Delta_{пр})(w_в+1),\ см, \quad (14\text{-}148)$$

где $\Delta_{пр}$ — толщина изоляционной прокладки между витками (для гидрогенераторов $\Delta_{пр}=0{,}4$ *мм*), и высота сердечника полюса

$$h_m=h_{кат}+t_{ш1}+t_{ш2}+t_с+\Delta_д,\ см, \quad (14\text{-}149)$$

где $t_{ш1}$ и $t_{ш2}$ — верхняя и нижняя шайбы из изоляционного материала (см. табл. 5-7; для гидрогенератора шайбы делаются из лигнофолия или гетинакса при $t_ш\approx 1{,}5\,a$, но не менее 1,2 *см*);

$t_с$ — металлическая шайба толщиной 0,3—0,4 *см* (для больших машин); в нее упираются пружины, укладываемые в обод ротора и прижимающие катушку к полюсному наконечнику;

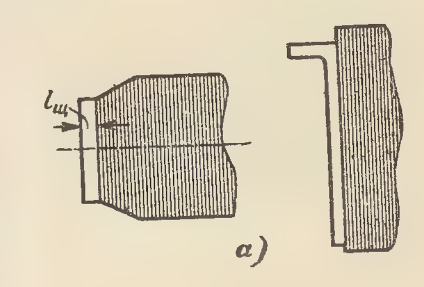
$\Delta_д$ = 0,2 *см* (для учета возможных плюсовых допусков меди, изоляции и т. п.).

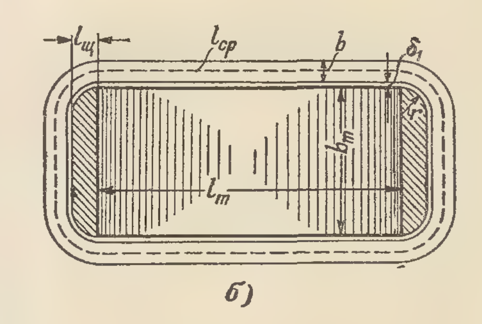
Полученный размер h_m не должен заметно отличаться от ранее выбранного. В случае необходимости можно несколько изменить b_m при одновременном изменении l_m. Для машин средней мощности можно увеличить размер x на рис. 14-37 путем небольшого среза витков катушки в ее нижней части.

После того как установлены размеры b_m и l_m, можно определить среднюю длину витка обмотки:

$$l_{в.ср}=2\,(l_m+b_m-2r)+\pi\,(2r+2\delta_1+0{,}1b),\ см \quad (14\text{-}150)$$

при двухрадиусной катушке (рис. 14-40, *б*; при $b_m>20$ *см*; r не менее $0{,}1\,b$, *см*);





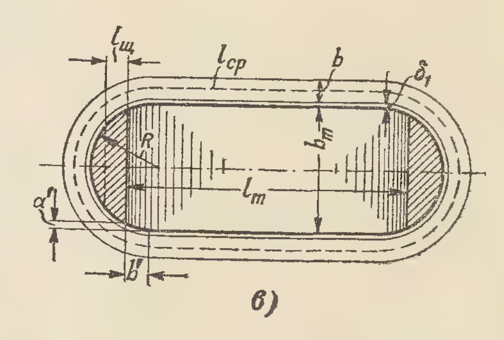


Рис. 14-40. К определению средней длины витка $l_{в.ср}$.

а — щеки полюса из кованой стали; *б* и *в* — сечения полюса со щеками из литой стали ($a'=0{,}3$—$0{,}6$ *см*; $b'=1{,}0$—$3{,}0$ *см*).

$$l_{в.ср} = 2(l_m - 2b') + \pi(b_m + 2\delta_1 + 0{,}1b),\ см, \quad (14\text{-}151)$$

при однорадиусной катушке (рис. 14-40,*в*); размер b' можно взять из таблицы в зависимости от b_m:

b_m, *см*	6	6—10	10,1—12	12,1—15	15,1—20
b', *см*	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0

При кованых щеках (рис. 14-40,*а*) можно для определения $l_{в.ср}$ использовать ту же формулу (14-151).

Теперь можно определить:

сопротивление обмотки возбуждения

$$r_в = \frac{\rho_t (2p) w_в l_{в.ср}}{100 s_в},\ ом; \quad (14\text{-}152)$$

ток возбуждения при номинальной нагрузке

$$I_{в.н} = \frac{F_{в.н}}{2w_в},\ а; \quad (14\text{-}153)$$

плотность тока $\Delta_в = I_{в.н}/s_в$, $а/мм^2$ и превышение температуры

$$\Theta_в = \frac{1}{400}\frac{\Delta_в^2 b}{\alpha k},\ °С, \quad (14\text{-}154)$$

где α и k — из рис. 14-38.

Коэффициент запаса возбуждения

$$k_в = \frac{U'_в}{r_в I_{в.н}}. \quad (14\text{-}155)$$

Номинальная мощность возбудителя

$$P_{в.н} = U_{в.н} I_{в.н} \cdot 10^{-3},\ квт. \quad (14\text{-}156)$$

б) **Турбогенераторы.** Обратимся к расчету обмотки возбуждения турбогенератора.

Здесь также вначале должна быть определена н. с. $F_{в.н}$. Она определяется при помощи диаграммы Потье, для построения которой необходимо иметь:

$$x_\sigma^* \text{ и } x_р^* \approx x_\sigma^* + 0{,}02,\ \text{отн. ед.};$$

$$F_{э.в} = F'_a = k_a F_a,\ а \quad (14\text{-}157)$$

или в относительных единицах

$$F'^*_a = \frac{k_a F_a}{F_{в0}}, \quad (14\text{-}158)$$

где x_σ^* — рассчитывается по (14-62);

$F_{э.в} = F'_a$ — н. с. обмотки возбуждения, эквивалентная н. с. якоря (статора);

$$F_a = 2{,}7 I_н w_1 k_{о1},\ а; \quad (14\text{-}159)$$

k_a — коэффициент приведения н. с. якоря к н. с. обмотки возбуждения, который можно взять из таблицы:

γ	0,625	0,667	0,7	0,75	0,8
k_a	0,923	0,943	0,97	1,0	1,035

или рассчитать по формуле

$$k_a = \frac{\pi^2 \gamma}{8 \sin \gamma \frac{\pi}{2}}; \quad (14\text{-}160)$$

$F_{в0}$ — н. с. обмотки возбуждения при холостом ходе и $E_0 = U_н$ (согласно ОСТ 7429 и ГОСТ 533-51 н. с. $F_{в0}$ принимается за базисную единицу при построении характеристики холостого хода в относительных единицах).

Построение диаграммы Потье для величин в относительных единицах приведено на рис. 14-41 (активным сопротивлением r_a пренебрегаем).

Из диаграммы находим $F^*_{в.н}$, отн. ед. и $F_{в.н} = F^*_{в.н} F_{в0}$, *а*.

В качестве возбудителей применяются генераторы постоянного тока, соединяемые при помощи полуэластичной муфты (или «гибкого вала») с валом турбогенератора.

Такие возбудители для турбогенераторов мощностью до 100—130 *Мвт* получаются достаточно надежными. При большей мощности турбогенераторов (примерно со 150 *Мвт*), имеющих внутреннее непосредственное охлаждение обмотки ротора, мощность возбуждения значительно возрастает. Соответственно возрастает мощность возбудителя, который должен иметь отношение верхнего предела («потолка») напряжения к номинальному не менее 2 и допускать двухкратный номинальный ток в течение не менее 50 *сек* (по ГОСТ 533-51).

В этом случае машина постоянного тока при 3 000 *об/мин* не может быть сделана достаточно надежной — получаются чрезмерными реактивная э. д. с., напряжение между соседними коллекторными пластинами или окружные скорости якоря и коллектора (см. § 12-15).

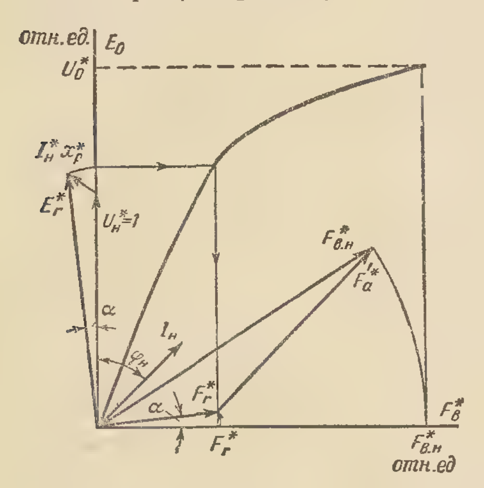


Рис. 14-41. Построение диаграммы Потье для определения н. с. $F_{в.н}$.

Приходится отказаться от применения машин постоянного тока в качестве возбудителей турбогенераторов при $P_н \geqslant 150$ *Мвт*. Можно было бы снизить скорость вращения возбудителя, соединяя его с валом турбогенератора при помощи редуктора, но такая установка получается громоздкой и, по-видимому, малоудобной в эксплуатации.

На заводе «Электросила» для турбогенераторов при $P_н \geqslant 150$ *Мвт* применяются в качестве возбудителей индукторные генераторы переменного тока повышенной частоты (500 *гц*), соединяемые при помощи муфты с турбогенераторами. Переменный ток при этом преобразуется в постоянный при помощи полупроводниковых выпрямителей.

При проектировании обмотки возбуждения сначала можно выбрать напряжение возбудителя $U_в$. Оно обычно лежит в пределах:

75—115 *в*	при $P_н = 0{,}5 \div 6$ *Мвт*:
200—250 (200*) *в*	при $P_н = 12 \div 50$ *Мвт*;
250—350* *в*	при $P_н = 100 \div 320$ *Мвт*

(отмеченное звездочкой относится к турбогенераторам ТВФ и ТВВ).

Напряжение на кольцах $U'_в$ примерно на 2—3 *в* меньше $U_в$. Затем определяется средняя длина витка обмотки возбуждения

$$l_{в2} = 2(l_2 + l_{л2}),\ см, \quad (14\text{-}161)$$

где средняя длина лобовой части полувитка обмотки ротора

$$l_{л2} = 2C_2 + b_2 q_2 + C'_2(q_2 - 1) + k_\gamma D_{ср} - 0{,}86\left(R + \frac{b_2}{2}\right),\ см \quad (14\text{-}162)$$

[b_2, *см* — ширина проводника; $q_2 = Z_2/4$ — число катушек на полюс; k_γ — по (14-96); C_2, C'_2, $D_{ср}$, R — размеры, *см* (см. рис. 14-42)].

Для крупных турбогенераторов ($P_н \geqslant 100$ *Мвт*) можно принять

$$l_{л2} \approx 1{,}35D',\ см. \quad (14\text{-}162а)$$

После этого определяется сечение проводника обмотки возбуждения

$$s'_в = \frac{1{,}1 F_{в.н}\, l_{в2} \cdot 10^{-2}}{39 U_в},\ мм^2. \quad (14\text{-}163)$$

Здесь для запаса н. с. взята равной 1,1 $F_{в.н}$; удельное сопротивление меди принято равным $^1/_{39}$ соответственно максимальной допустимой температуре для обмотки ротора $90+40=130°$ C (ГОСТ 533-51).

Размеры проводника $a_2 \times b_2$ при косвенном охлаждении ротора выбираются по табл. IV-5 в соответствии с шириной паза $b_{п2}$ и с уче-

(Размеры, *см*)

D'	C_2	C'_2	R	d
50	4,5	1,0	2,5	1,0
50—70	5,0	1,2	3,0	1,5
70—80	6,0	1,5	3,5	2,0
80—90	8,0	2,0	3,5	2,5
90—110	8—10	2,5	3,5	3,0

Рис. 14-42. К определению $l_{л2}$.

том изоляции (рис. 14-43 и табл. 14-12 а). Так как ширина b_2 была определена ранее одновременно с шириной паза $b_{п2}$, то здесь надо определить только размер a_2 из равенства $a_2 \times b_2 \approx s_в$, $мм^2$, так чтобы $s_в$ как можно меньше отличалось от $s'_в$.

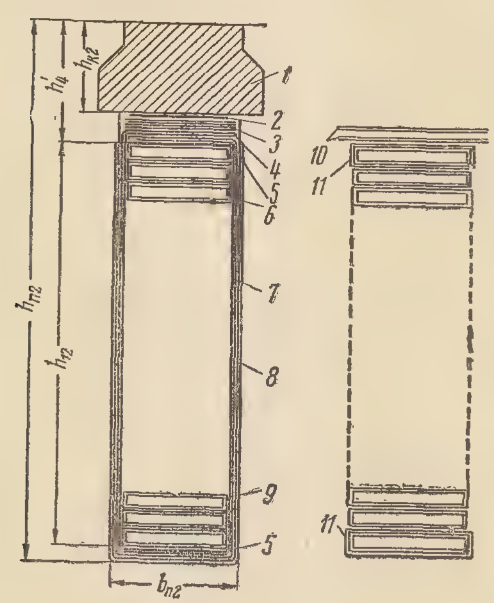


Рис. 14-43. Паз ротора с проводниками и изоляцией и сечение лобовой части катушки роторной обмотки турбогенератора с косвенным охлаждением (см. табл. 14-12а).

Теперь, зная a_2 и выбранную ранее высоту паза $h_{п2}$, можем найти число проводников в пазу ротора:

$$u_{п2} \approx \frac{h_{12}}{a_2 + \Delta_{из}} \qquad (14\text{-}164)$$

[h_{12} — высота паза, занятая проводниками и витковой изоляцией, имеющей двустороннюю толщину $\Delta_{из}$ на проводник (рис. 14-43); $u_{п2}$ должно быть целым; при этом размеры h_{12}, а следовательно, и $h_{п2}$ могут быть изменены лишь в небольшой степени].

Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$w_2 = q_2 u_{п2}. \qquad (14\text{-}165)$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{в.н} = \frac{F_{в.н}}{2w_2}, \ а. \qquad (14\text{-}166)$$

Плотность тока в проводниках обмотки возбуждения

$$\Delta_2 = \frac{I_{в.н}}{s_в}, \ а/мм^2 \qquad (14\text{-}167)$$

[при косвенном охлаждении $\Delta_2 \approx \approx 3{,}5 \div 4{,}3$ $а/мм^2$ (больше при водородном охлаждении и при $P_н < < 6$ $Мвт$)].

После того как окончательно установлены значения $s_в$, w_2, $l_{в2}$, сле-

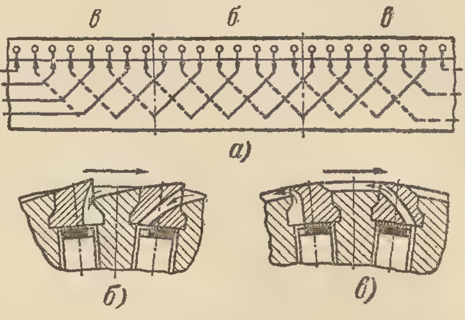


Рис. 14-44. Непосредственное охлаждение проводников обмотки ротора (турбогенераторы ТВФ и ТВВ).

а — схема протекания газа в пазовых частях; *б* — зона впуска газа (верхняя кромка клиньев выступает над поверхностью бочки ротора на 3—5 *мм*); *в* — зона выпуска газа. (В обоих зонах клинья с различным расположением отверстий чередуются.)

дует определить омические сопротивления обмотки возбуждения:

$$r_{2(15)} = \frac{2w_2 l_{в2} \cdot 10^{-2}}{57 s_в}, \ ом \text{ при } 15\,°C;$$

$$r_{2(75)} = 1{,}24 r_{2(15)}, \ ом \text{ при } 75\,°C;$$

$$r_{2(130)} = 1{,}46 r_{2(15)}, ом \text{ при } 130°C. \quad (14\text{-}168)$$

Номинальные напряжения на кольцах и возбудителе

$$U'_{в.н} = I_{в.н} r_{2(130)}, \ в;$$

$$U_{в.н} = U'_{в.н} + 2 \div 3 \, в \quad (14\text{-}169)$$

(они могут отличаться от ранее выбранных $U'_в$ и $U_в$).

Номинальная мощность возбудителя

$$P_{в.н} = U_{в.н} I_{в.н} \cdot 10^{-3}, \ квт. \quad (14\text{-}170)$$

При непосредственном охлаждении обмотки ротора по системе завода «Электросила» определение размеров проводников обмотки производится отдельно для ее пазовой и лобовой частей.

На рис. 14-44 и 14-45 показаны принципиальные схемы протекания газа в пазовых и лобовых частях обмотки ротора. В проводниках, уло-

Таблица 14-12а

Изоляция роторных обмоток турбогенераторов с косвенным охлаждением

Позиция на рис. 14-43	Материал, размеры, выполнение, назначение
1	Клин сплошной из дюралюминия; высота $h_{к2} \approx (0{,}9 \div 1{,}1)\ b_{п2}$ (составной клин делается из стали и бронзы или латуни)
2	Стальная полоса (толщина 1—1,5 *мм*; длина меньше l_2 на 4—6 *мм*; ширина меньше $b_{п2}$ на 0,5—1,5 *мм*); применяется для облегчения продвижения клиньев при их забивании; при несимметричной нагрузке предохраняет стыки клиньев от подгорания, если они составлены из двух или более частей по длине ротора
3	Миканит прокладочный, несколько слоев, общая толщина 2—5 *мм*
4	Загнутые края изоляционной гильзы
5	Миканит прокладочный (с малым содержанием связующего) толщиной 0,5 *мм*.
6	Медный проводник
7	Изоляционная гильза из формовочного миканита толщиной 1,0—1,2 *мм*
8	Оболочка из белой жести (армировка изоляционной гильзы) толщиной 0,35—0,5 *мм*; применяется для предохранения основной гильзовой изоляции от механических повреждений и для увеличения теплопроводности пазовой изоляции
9	Витковая изоляция по всей длине витка из микаленты толщиной 0,13 *мм* (один слой вполуперекрой); в последние годы более часто применяется изоляционная липкая стеклолента толщиной 0,1—0,12 *мм* (один слой, вполуперекрой); для более крупных машин (при водородном охлаждении) каждый виток изолируется двумя полосками миканита толщиной 0,15 *мм*, притянутыми к проводнику липкой стеклолентой толщиной 0,1 *мм* (один слой впритык)
10	Подбандажная изоляция; общая толщина 3,5—5,5 *мм*
11	Стеклянная или асбестовая лента, намотанная вполуперекрой (толщина 0,5 *мм*).

женных в пазы, на обеих сторонах имеются вырезы, образующие косые каналы (рис. 14-44 а). В эти каналы поступает газ за счет действия выступов клиньев (так называемых заборников). Газ захватывается из части зазора, расположенной под отсеком холодного газа, т. е. того газа, который при многоструйной вентиляции из этого отсека проходит по радиальным каналам статора к зазору.

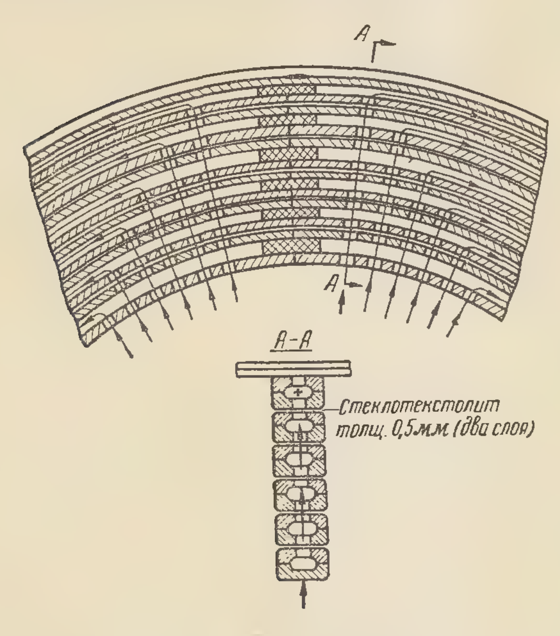


Рис. 14-45. Ход газа в лобовых частях.

Далее газ проходит по косым каналам между пазовой изоляционной гильзой и голой медью проводников (в их вырезах) к отверстиям в клиньях в зоне выпуска газа и выбрасывается в ту часть зазора, которая находится под отсеком горячего газа. Отсюда в этот отсек газ попадает, протекая по радиальным каналам статора.

В косых каналах, образованных вырезами в проводниках, получается достаточная скорость газа (до 0,2—0,3 окружной скорости ротора) за счет самовентилирующего действия указанного специального устройства клиньев и срезов (фасок) на поверхности ротора перед отверстиями в клиньях. Тепло, образующееся в проводниках, уносится газом, непосредственно омывающим их голые части.

Заготовки лобовых частей из коробчатой меди (при ширине b_2 и высоте a_2) наматываются в виде катушек и разрезаются на четыре части. Отдельные части подгоняются по шаблону к пазовым частям и привариваются к ним. Скомплектованные полувитки калибруются на шаблонах (при этом им придается окончательная форма), и после наложения витковой изоляции (стеклотекстолитовые прокладки) они укладываются в пазы ротора и соединяются сваркой.

Ввиду того что виток в лобовой части составлен из стержней коробчатого сечения и имеет увеличенную высоту, число проводников в пазу будет меньше, чем в обычной конструкции машин с косвенным охлаждением. Поэтому для машин типов ТВФ и ТВВ приходится несколько снижать $U_в$.

Газ, охлаждающий лобовые части, поступает с их внутренней стороны в отверстия, как показано на рис. 14-45. Далее газ проходит внутри проводников лобовых частей и выбрасывается в зазор вблизи торцов крайних пакетов статора.

Для машин типов Т, ТВ и ТВФ применяется радиальная многоструйная (поперечно-секционированная) вентиляция, при которой практически весь охлаждающий газ проходит через зазор машины.

Число отсеков с горячим газом n_c определяет «струйность» вентиляции; например, при n_c, равном 2, 3, 4, соответственно получим двух-, трех-, четырехструйную вентиляцию.

Число всех отсеков равно $2n_c-1$; длина отсека $l_{отс}$ принимается одинаковой для отсеков с горячим и холодным газом.

Для машин типов Т и ТВ $l_{отс} \doteq 50 \div 80$ *см*. При l_1 до 150 *см* (машины типа Т) применяется одноструйная вентиляция. Для машин типа ТВФ $l_{отс}=40 \div 60$ *см*, причем здесь $n_c=3 \div 6$.

Для машин типа ТВВ с относительно большим зазором δ и уменьшенным ежесекундным расходом газа в настоящее время обычно применяется одноструйная вентиляция; здесь для ротора также длина «отсека» $l_{отс}=40 \div 60$ *см*.

Следовательно, для машин типов ТВФ и ТВВ имеем:

$$n_c = 0{,}5\left(\frac{l_2}{40 \div 60} + 1\right) \quad (14\text{-}171)$$

при

$$l_{отс} = \frac{l_2}{2n_c - 1}, \ см. \quad (14\text{-}172)$$

При определении размеров проводников для пазовой и лобовой частей обмотки ротора, имеющей непосредственное охлаждение, сначала выбирается число проводников на паз $u_{п2}$. Оно в современных машинах изменяется в узких пределах $u_{п2}=7 \div 10$.

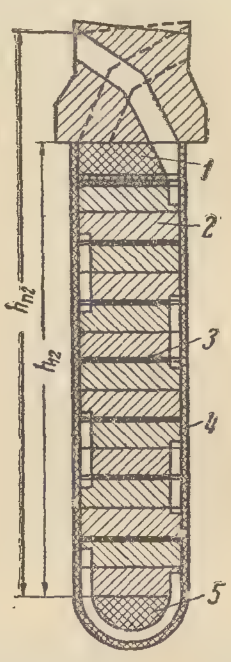


Рис. 14-46. Паз ротора с проводниками и изоляцией турбогенератора ТВФ и ТВВ.

1 — прокладка стеклотекстолитовая толщина 8—12 *мм*; *2* — медный проводник; *3* — витковая изоляция, две текстолитовые прокладки толщиной 0,5 *мм* каждая; *4* — изоляционная гильза из стеклотекстолита, толщина 2 *мм*; *5* — прокладка стеклотекстолитовая.

Затем при выбранных ранее размерах паза $h_{п2}$ и h_{12} (рис. 14-46) определяется высота проводника a_2 с учетом изоляционных прокладок между проводниками (толщина прокладки 1 *мм*)

$$a_2 = \frac{h_{12} - (u_{п2} - 1)}{u_{п2}}, \ мм \quad (14\text{-}173)$$

(a_2 — по стандарту, см. табл. IV-5).

Далее надо определить вырезы в проводниках пазовой части для их внутреннего охлаждения (рис. 14-47)

Число охлаждающих каналов $n_{п.в}$ с одной стороны паза на длине впускной (также и выпускной) части, т. е. на длине $l_{отс}$, обычно берется равным семи или восьми.

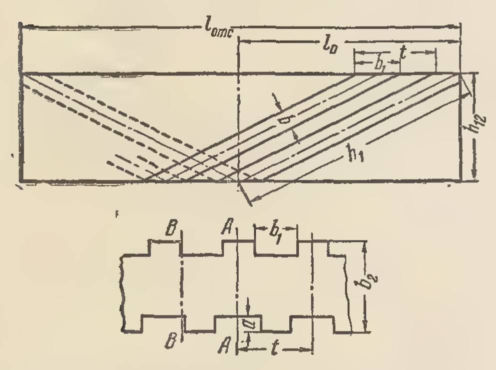


Рис. 14-47. К определению активного сечения проводника в пазовой части.

Длина охлаждающего канала

$$h_1 = \sqrt{l_0^2 + h_{12}^2}, \; мм, \quad (14\text{-}174)$$

где

$$l_0 = 0{,}5 l_{отс}, \; мм. \quad (14\text{-}175)$$

Следует принять ширину канала $b = 16$ *мм* и глубину выреза с боковых сторон проводника $a = 5$ *мм* (по данным завода «Электросила»).

Ширина выреза на поверхности проводника

$$b_1 = h_1 \frac{b}{h_{12}}, \; мм. \quad (14\text{-}176)$$

Расстояние между вентиляционными каналами

$$t = \frac{l_{отс}}{n_{п.в}}, \; мм. \quad (14\text{-}177)$$

Теперь можем определить активное сечение проводника пазовой части $s_{в.а}$. Для этого вначале найдем сечение сплошного проводника: $s_в = a_2 \times b_2$, *мм*^{2}; затем (см. рис. 14-47) сечение по AA; $s_{в1} = a_2(b_2 - a)$, *мм*^{2} и сечение по BB: $s_{в2} = a_2(b_2 - 2a)$, *мм*^{2}.

После этого определяем коэффициент приведения сечения проводника в пазовой части к активному сечению (с учетом вырезов):

$$k_{п.а} = \frac{1}{\left(2 - \frac{2b_1}{t}\right)\frac{s_в}{s_{в1}} + \left(\frac{2b_1}{t} - 1\right)\frac{s_в}{s_{в2}}} \quad (14\text{-}178)$$

(обычно $k_{п.а} = 0{,}77 \div 0{,}80$).

Отсюда

$$s_{в.а} = k_{п.а}\, s, \; мм^2. \quad (14\text{-}179)$$

(Иногда при $l_{отс} \approx 60$ *см* выбирается $n_{п.в}$ до 14; в этом случае размеры a и b должны быть снижены.)

Активное сечение проводника в лобовой части (рис. 14-48)

$$s_{л.а} = s'_в - s_к, \; мм^2, \quad (14\text{-}180)$$

где

$$s'_в = a_2 b_2 - 0{,}86 r^2, \; мм^2; \quad (14\text{-}180а)$$

$$s_к = (b_к - 2R_к)\, 2R_к + 0{,}785\,(2R_к)^2, \; мм^2 \quad (14\text{-}180б)$$

[$b_к \approx 14$ *мм*; $r \approx 2$ *мм*; $R_к \approx 4{,}5$ *мм*;

$$s_{л.а}/s'_в = 0{,}72 \div 0{,}76$$

(больше при $P_н \geqslant 150 \div 200$ *Мвт*)];

$$r_{2(15)} = \frac{4w_2}{55}\left(\frac{l_2}{s_{в.а}} + \frac{l_{л2}}{s_{л.а}}\right) 10^{-2}, \; ом. \quad (14\text{-}181)$$

Здесь длина лобовой части $l_{л2}$ *см* определяется по (14-162). Для обмотки ротора турбогенератора при $P_н \geqslant 50$ *Мвт* в настоящее время применяется медь с присадкой серебра, что повышает прочностные свойства проводника и несколько увеличивает его удельное сопротивление — до $^1/_{55}$ при 15° С.

Сопротивления $r_{2(75)}$ и $r_{2(130)}$ определяются по (14-168).

Далее следует определить номинальные ток возбуждения $I_{в.н}$ по (14-166), напряжения на кольцах и возбудителя $U'_{в.н}$ и $U_{в.н}$ по (14-169) и мощность возбудителя по (14-170).

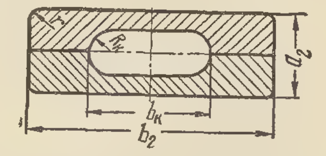


Рис. 14-48. К определению активного сечения проводника в лобовой части.

Следует также определить плотности тока в проводниках пазовой $\Delta_{п2}$ и лобовой $\Delta_{л2}$ частей:

$$\Delta_{п2} = \frac{I_{в.н}}{s_{в.а}}, \; а/мм^2$$

и

$$\Delta_{л2} = \frac{I_{в.н}}{s_{л.а}}, \; а/мм^2. \quad (14\text{-}182)$$

Они лежат в пределах: $\Delta_{п2} \approx 6 \div 7{,}5$ *а/мм²* для машин типа ТВФ; $\Delta_{п2} \approx 8 \div 10$ *а/мм²* для машин типа ТВВ; $\Delta_{л2}$ соответственно больше на 10—20%.

14-9. УСПОКОИТЕЛЬНАЯ (ПУСКОВАЯ) ОБМОТКА

Нормальные трехфазные синхронные генераторы, как правило, выполняются без успокоительной обмотки.

Гидрогенераторы согласно ГОСТ 5616-63 должны иметь успокоительную обмотку. По согласованным техническим условиям гидрогенераторы мощностью до 4 000 *ква* допускается изготавливать без успокоительной обмотки.

Применение успокоительной обмотки для больших генераторов, особенно для крупных гидрогенераторов, предназначенных для работы на длинные линии электропередачи, оказалось необходимым для предотвращения динамических перенапряжений при несимметричных коротких замыканиях и для повышения устойчивости их работы.

Кроме того, успокоительная (полная) обмотка при несимметричной нагрузке генератора в большой степени способствует сохранению синусоидальной формы кривой его э.д.с. и симметрии напряжений на его зажимах.

Генераторы, которые должны приводиться во вращение поршневыми двигателями (например, дизель-генераторы) и работать параллельно с другими синхронными генераторами, снабжаются успокоительной клеткой для уменьшения колебаний агрегата.

Турбогенераторы нормального исполнения не имеют отдельной успокоительной обмотки. Однако в ряде случаев, особенно при $P \geqslant 500$ *Мвт*, ее применение может оказаться необходимым для повышения надежности работы турбогенератора при несимметричной нагрузке и в асинхронном режиме с небольшой нагрузкой.

Для синхронных двигателей и для многих синхронных компенсаторов всегда применяется успокоительная обмотка. Она здесь служит в качестве пусковой обмотки при асинхронном пуске их в ход.

Для синхронных генераторов успокоительную обмотку выполняют из медных стержней, обычно круглого сечения, закладываемых в пазы полюсных наконечников. С боковых сторон стержни замыкаются пластинами, расположенными или только вдоль полюсной дуги, или и над междуполюсным пространством. В последнем случае пластины отдельных полюсов соединяются между собой и образуют короткозамыкающие кольца. Таким образом, получается или продольная (неполная), или продольно-поперечная (полная) успокоительная клетка. Первая применяется сравнительно редко и только для генераторов небольшой и средней мощности. Для больших генераторов, гидрогенераторов и для двигателей всегда применяется полная клетка.

При выборе пазового деления t_2 (рис. 14-4) для успокоительной (пусковой) обмотки, а также числа ее стержней (пазов) на полюс $Q_у$ следует исходить из приведенных ниже соотношений.

Для уменьшения добавочных потерь в успокоительной клетке желательно иметь t_2 возможно более близким к пазовому делению статора t_1.

Если q_1—целое число, или $q_1 = b + \frac{c}{d} = b + \frac{1}{2}$, или $bd + c \leqslant 9$, то должно быть выполнено условие

$$0{,}8t_1 < t_2 < t_1. \qquad (14\text{-}183)$$

При тех же значениях q_1 для уменьшения амплитуд гармоник в кривой э.д.с. статора, обусловленных его зубчатостью, необходимо иметь:

$$(Q_у - 1)\, t_2 \approx \frac{6kq_1}{6q_1 + 1} t_1, \qquad (14\text{-}184)$$

где $k = 1, 2, 3...$

При $bd + c > 9$ зубцовые гармоники в кривой э.д.с. (из-за зубчатости статора) практически не проявляются. Поэтому здесь можно принять $t_2 = t_1$.

Для генераторов и двигателей сечение стержня успокоительной клет-

ки $s_у$ и его диаметр $d_с$ можно определить по формулам:

$$s_у = \frac{(0,15 \div 0,4)\, 3q_1 u_{п1} n_{эл} s_с}{Q_у}, \text{ мм}^2; \quad (14\text{-}185)$$

$$d_с = 1,13\sqrt{s_у}, \text{ мм}, \quad (14\text{-}186)$$

где $3q_1 u_{п1} n_{эл} s_с$ — сечение проводников статорной обмотки, приходящихся на полюсное деление, $мм^2$.

Коэффициенты в (14-185) принимаются: 0,15—0,3 для генераторов (для гидрогенераторов обычно 0,15); 0,34—0,4 для двигателей при медных стержнях (до 0,5 при латунных стержнях).

Диаметр $d_с$ выбирается кратным 0,5 *мм*, чему соответствует нормальный сортамент круглого цветного металла.

Число стержней на полюс $Q_у$ должно быть выбрано с учетом следующего условия:

$$Q_у \leqslant \frac{b_р - d_с - 2z}{t_2} + 1, \quad (14\text{-}187)$$

где z — минимальное допустимое расстояние от крайнего стержня до края полюсного наконечника; $z \geqslant 0,3 \div 0,7$ *см* для машин небольшой и средней мощности; $z \geqslant 0,8 \div 1$ *см* для гидрогенераторов.

Короткозамыкающие пластины, называемые сегментами успокоительной клетки, имеют следующие размеры (рис. 14-4): $a_к \approx 2d_с$ (примерно на 5 *мм* меньше высоты полюсного наконечника); $b_к \geqslant 0,7\, d_с$ при $a_к \times b_к \approx 0,5 Q_у s_у$.

Размеры полосовой меди $a_к$ и $b_к$ выбираются по стандарту (приложение IV).

Концы сегментов соседних полюсов соединяются между собой при помощи пластины, наложенной на них. При этом площадь контакта пластины с сегментом должна составлять около семи—десяти сечений сегмента.

Для больших машин (примерно при $P_н > 2 \div 3$ *Мвт*) делаются гибкие соединения сегментов, набранные из луженых тонких медных пластин толщиной 0,2—0,5 *мм* и выгнутые в виде петли. Такие гибкие соединения называются соединительными компенсаторами. Они должны в основном компенсировать температурные расширения сегментов без нарушения цельности соединения.

Диаметр круглой части паза d_1 приблизительно равен $d_с + (0,1 \div 0,2$ *мм*); размеры его верхней части: $b_ш = 3$ *мм*, $h_ш = 3$ *мм* (для двигателей размер $h_ш$ иногда уменьшают до 1,5—2 *мм*).

Для получения надлежащей механической прочности кромок полюсного наконечника обычно требуется выполнить следующее условие: $h_р \geqslant 2,5 d_1$.

14-10. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ СИНХРОННЫХ МАШИН

а) **Явнополюсные машины.** При исследовании установившихся и переходных режимов синхронной машины используются многие параметры и постоянные времени ее цепей, которые могут быть с некоторым приближением определены расчетным путем.

В последующем приводятся расчетные формулы, мало отличающиеся от применяемых на заводах Советского Союза [Л. 108, 111, 114]. По этим формулам рассчитываются параметры машины в относительных единицах, причем здесь имеется в виду взаимная система относительных единиц, при которой параметры вторичных цепей получаются приведенными к обмотке статора и могут быть непосредственно (без введения каких-либо коэффициентов) использованы в схемах замещения синхронной машины.

Вначале приводятся расчетные формулы для явнополюсных машин.

Активное сопротивление обмотки статора

$$r_a^* = r_a \frac{I_н}{U_н}, \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}188)$$

здесь r_a принимается равным сопротивлению r_1, которое рассчитывается по (7-6) при известных w_1, $l_{ср}$, $n_{эл}$, $s_с$, a_1, ϱ_{75} и $k_r = 1$. Для больших машин среднюю длину витка обмотки статора можно определить по эмпирической формуле

$$l_{ср} \approx 2(l_1 + l_{л1})\, 10^{-2}, \text{ м}, \quad (14\text{-}189)$$

где длина лобовой части

$$l_{л1} \approx 4,4 U_{н.л} + 1,2\tau +$$

$$+(14 \div 17),\ см \qquad (14\text{-}190)$$

($U_{н.л}$ — в киловольтах; добавка берется тем больше, чем больше $P_н$ и q_1).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$x_\sigma^* = x_\sigma \frac{I_н}{U_н},\ \text{отн. ед.}, \qquad (14\text{-}191)$$

где x_σ рассчитывается по (7-57).

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси[1]

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{F'_{\delta 0}},\ \text{отн. ед.}; \qquad (14\text{-}192)$$

здесь k_{ad} — по рис. 6-23; F_a — н.с. статора при $I_н$ по (6-98) или (14-159); $F'_{\delta 0} = (1,05 \div 1,12) F_{\delta 0}$ (с учетом зазоров между полюсами и ярмом ротора), где $F_{\delta 0}$ — магнитное напряжение воздушных зазоров при $E_0 = U_н$.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси

$$x_{aq} = \frac{k_{aq} F_a}{F_{\delta 0}} \frac{1 + k_\delta}{2},\ \text{отн. ед.}, \qquad (14\text{-}193)$$

где k_{aq} — по рис. 6-23.

Синхронные индуктивные сопротивления:

по продольной оси

$$x_d = x_\sigma + x_{ad},\ \text{отн. ед.}; \qquad (14\text{-}194)$$

по поперечной оси

$$x_q = x_\sigma + x_{aq},\ \text{отн. ед.} \qquad (14\text{-}195)$$

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_в \approx 1,27 k_{ad} x_{ad} \left(1 + \frac{2F_{\delta 0}\, l'_m \Sigma \lambda}{\Phi_0}\right),\ \text{отн. ед.} \qquad (14\text{-}196)$$

Здесь l'_m — по (14-90);

$$\Sigma \lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1,53} + \frac{\lambda_{mb}}{2,65}, \qquad (14\text{-}197)$$

где

$$\lambda_{pl} = 1,4\left(\frac{d_t}{c_p} - 0,25\right) + 0,55\left(\frac{a_p}{c_p} + 0,2\right) - 0,4\left(\frac{a_p}{c_p} - 0,5\right)^2; \qquad (14\text{-}198)$$

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 h_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)}; \qquad (14\text{-}199)$$

$$\lambda_{mb} = 0,37 \frac{b_m}{l'_m}; \qquad (14\text{-}200)$$

при этом (рис. 14-37)

$$a_p = \frac{b_p - b_m}{2}; \quad c_p = \tau - b_p - \frac{2\pi d_t}{2p},$$

где

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D}$$

[все размеры — в сантиметрах; в (14-198) при $\frac{d_t}{c} < 0,25$ первый член можно принять равным нулю].

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{в\sigma} = x_в - x_{ad},\ \text{отн. ед.} \qquad (14\text{-}201)$$

Индуктивное сопротивление полной успокоительной (или пусковой) клетки:

по продольной оси

$$x_{у\sigma d} = 3,9 \frac{F_a}{\Phi_0} \frac{1}{1 - k_у} \Lambda_{у\sigma d},\ \text{отн. ед.}; \qquad (14\text{-}202)$$

по поперечной оси

$$x_{у\sigma q} = 3,9 \frac{F_a}{\Phi_0} \frac{1}{1 + k_у} \Lambda_{у\sigma q},\ \text{отн. ед.} \qquad (14\text{-}203)$$

Здесь

$$k_у = \frac{\sin Q_у \alpha_у}{Q_у \sin \alpha_у} \qquad (14\text{-}204)$$

при $\alpha_у = \frac{\pi}{\tau} t_2$ (значения $k_у$, $1 - k_у$, $1 + k_у$ можно взять из кривых рис. 14-49);

$$\Lambda_{у\sigma d} = \frac{l_р}{Q_у}(\lambda_{п.у} + \lambda_{д.у}) + \Lambda_{лd}; \qquad (14\text{-}205)$$

$$\Lambda_{у\sigma q} = \frac{l_р}{Q_у}(\lambda_{п.у} + \lambda_{д.у}) + \Lambda_{лq}, \qquad (14\text{-}206)$$

где $l_р$ — длина полюсного наконечника, *см*;

$\lambda_{п.у}$ — по (7-30) при круглых пазах (в формуле для $\lambda_п$ заменить b на d_1);

$$\lambda_{д.у} \approx \frac{t_2}{g_д \delta} \qquad (14\text{-}207)$$

[1] Здесь и далее в § 14-10 мы опускаем звездочку в обозначениях параметров, выраженных в относительных единицах (отн. ед.).

($g_д \approx 14$ при $\delta_м/\delta = 1$;

$g_д \approx 16{,}5$ при $\delta_м/\delta \approx 1{,}5$);

$$\Lambda_{лd} \approx 0{,}19\frac{\tau C_d}{Q_у}; \qquad (14\text{-}208)$$

$$\Lambda_{лq} \approx 0{,}19\frac{\tau C_q}{Q_у} \qquad (14\text{-}209)$$

(значения C_d и C_q — из кривых рис. 14-50).

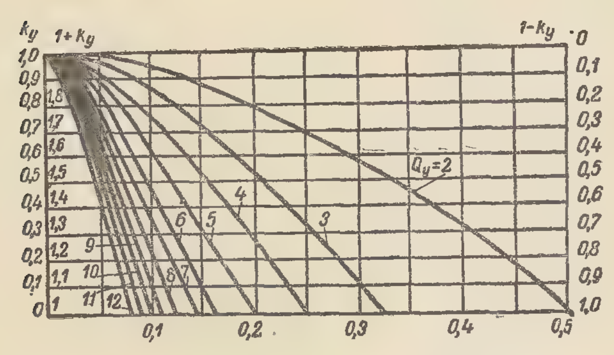


Рис. 14-49. Значения $k_у$, $1-k_у$, $1+k_у$.

Для неполной успокоительной клетки $x_{уσd}$ можно определить по (14-202), а $x_{уσq}$ — по приближенному равенству

$$x_{уσq} \approx (3 \div 4)\, x_{уσd}, \text{ отн. ед.} \qquad (14\text{-}210)$$

(больше при $Q_у > 6$ и $\alpha_p > 0{,}7$).

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_в = \frac{2200 F_a k_{ad}^2\, l_{в.ср}}{\Phi_0 f w_в s_в}, \text{ отн. ед.}, \qquad (14\text{-}211)$$

где $l_{в.ср}$, $w_в$ и $s_в$ — средняя длина витка (*см*), число витков на полюс и сечение проводника (*мм*²) обмотки возбуждения.

Можно также $r_в$ определить по формуле

$$r_в = r_{в75}\frac{3}{2}\left(\frac{\frac{4}{\pi}k_{ad}w_1k_{01}}{2pw_в}\right)^2\frac{I_н}{U_н}, \text{ отн. ед.}, \qquad (14\text{-}212)$$

где $r_{в75}$ — действительное сопротивление обмотки возбуждения при 75° С, *ом*.

Активное сопротивление полной успокоительной (или пусковой) клетки:

по продольной оси

$$r_{уd} = \frac{10\,800}{f}\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1-k_у}\left(\frac{c_c l_c}{Q_у s_у} + \frac{c_к \tau C_d}{Q_у s_к}\right),$$

отн., ед.; (14-213)

по поперечной оси

$$r_{уq} = \frac{10\,800}{f}\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1+k_у}\left(\frac{c_c l_c}{Q_у s_у} + \frac{c_к \tau C_q}{Q_у s_к}\right),$$

отн. ед., (14-214)

где $(1-k_у)$ и $(1+k_у)$ — из кривых рис. 14-49;

c_c — отношение удельного сопротивления материала стержней к удельному сопротивлению меди (для меди $c_c = 1$, для латуни $c_c = 4$);

$c_к$ — то же для короткозамыкающих сегментов;

l_c — длина стержня, *см* (рис. 14-4);

$s_у$ и $s_к$ — сечения стержня и сегмента, *мм*²;

C_d и C_q — из кривых рис. 14-50.

Для неполной клетки $r_{уd}$ — по (14-213),

$$r_{уq} \approx (8 \div 12)\, r_{уd}. \qquad (14\text{-}215)$$

Формулы для $r_{уd}$ и $r_{уq}$, так же как и ранее приведенные формулы для $x_{уσd}$ и

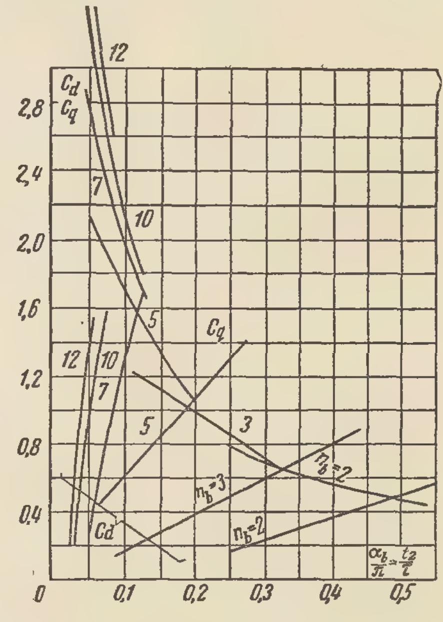


Рис. 14-50. Значения коэффициентов C_d и C_q.

$x_{y\sigma q}$, в обычных случаях дают удовлетворительные результаты при клетке с равномерным распределением стержней из однородного материала. Если клетка выполняется с неравномерным распределением стержней (что делается редко) или из стержней разнородного материала (например, иногда крайние стержни клетки делаются из латуни, а остальные из меди для повышения начального пускового момента синхронного двигателя), то расчет параметров клетки усложняется. При этом иногда обращаются к сложным и кропотливым методам расчета, в основу которых кладутся полные схемы замещения успокоительной клетки [Л. 117а]. Но эти методы требуют дальнейшего развития и уточнений, и их применение целесообразно при наличии специальных «расчетных столов» или вычислительных машин.

Для приближенных расчетов в случае применения стержней из разнородных материалов можно использовать формулы (14-213) и (14-214), заменив в них первый член в скобках выражением

$$\frac{c_c' c_c'' l_c}{\left(c_c' Q_y' + c_c'' Q_y''\right) s_y},$$

где Q_y' — число стержней на полюс из материала с относительным удельным сопротивлением c_c' и Q_y'' — число стержней на полюс из материала с относительным удельным сопротивлением c_c''.

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_d' = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{в\sigma}}\right)^{-1} = x_\sigma + \frac{x_{ad}\, x_{в\sigma}}{x_{ad} + x_{в\sigma}}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}216)$$

Переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_q' \approx x_q, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}217)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси при наличии успокоительной клетки

$$x_d'' = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{в\sigma}} + \frac{1}{x_{y\sigma d}}\right)^{-1} = x_\sigma + \frac{x_{y\sigma d}\left(x_d' - x_\sigma\right)}{x_{y\sigma d} + \left(x_d' - x_\sigma\right)}, \text{ отн. ед.,} \quad (14\text{-}218)$$

при отсутствии успокоительной клетки

$$x_d'' \approx x_d', \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}219)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси при наличии успокоительной клетки

$$x_q'' = x_\sigma + \frac{x_{aq}\, x_{y\sigma q}}{x_{aq} + x_{y\sigma q}}, \text{ отн. ед.,} \quad (14\text{-}220)$$

при отсутствии успокоительной клетки

$$x_q'' \approx x_q' \approx x_q, \text{ отн.ед.} \quad (14\text{-}221)$$

Индуктивное сопротивление обратной последовательности при работе на малое внешнее сопротивление

$$x_2 = \sqrt{x_d'' x_q''}, \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}222)$$

при работе машины на большое внешнее индуктивное сопротивление

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}223)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности машин с открытыми пазами при успокоительной клетке

$$x_0 \approx \frac{1{,}1 l_1 F_a}{\Phi_0 q_1 k_y^2}\left[(\beta - 0{,}555)\frac{h_{п1}}{b_{п1}} + (3\beta - 2)\frac{h_4}{b_{п1}}\right] + 0{,}355\frac{F_a(3\beta - 2)}{F_{\delta 0} k_y^2} \times \left[\left(\frac{1}{3q_1}\right)^2 + 0{,}39\left(\beta - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right)^2 + 0{,}037\right], \text{ отн.ед.;} \quad (14\text{-}224)$$

где $h_{п1}$ и $b_{п1}$ — глубина и ширина паза;

h_4 — расстояние от внутренней окружности статора до меди паза (см. рис. 14-21).

При отсутствии успокоительной клетки коэффициент 0,355 перед вторым членом нужно заменить коэффициентом 0,71.

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора и успокоительной

$$T_{d0} = \frac{x_в}{\omega r_в}, \text{ сек.} \quad (14\text{-}225)$$

Постоянная времени успокоительной обмотки по продольной оси при разомкнутых обмотках статора и возбуждения

$$T_{yd0} = \frac{x_{ad} + x_{y\sigma d}}{\omega r_{yd}}, \text{ сек.} \quad (14\text{-}226)$$

Постоянная времени успокоительной обмотки по поперечной оси при разомкнутой обмотке статора

$$T_{yq0}=\frac{x_{aq}+x_{y\sigma q}}{\omega r_{yq}},\ сек. \quad (14\text{-}227)$$

Постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке статора (при отсутствии успокоительной клетки)

$$T'_d=\frac{x'_d}{x_d}T_{d0},\ сек \quad (14\text{-}228)$$

(в соответствии с T'_d затухает периодическая составляющая продольного тока статора переходного процесса; при наличии успокоительной клетки T'_d на несколько процентов больше).

Постоянная времени успокоительной клетки по продольной оси при короткозамкнутой обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора

$$T''_{d0}=\frac{x_{ad}x_{в\sigma}+x_{ad}x_{y\sigma d}+x_{в\sigma}x_{y\sigma d}}{\omega r_{yd}(x_{в\sigma}+x_{ad})},\ сек. \quad (14\text{-}229)$$

Постоянная времени успокоительной клетки по продольной оси при короткозамкнутых обмотках возбуждения и статора

$$T''_d=\frac{x''_d}{x'_d}T''_{d0},\ сек \quad (14\text{-}230)$$

(в соответствии с T''_d затухает периодическая составляющая продольного тока статора сверхпереходного процесса).

Постоянная времени успокоительной клетки по поперечной оси при короткозамкнутой обмотке статора

$$T''_q=\frac{x''_q}{x_q}T_{yq0},\ сек. \quad (14\text{-}231)$$

Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a=\frac{x_2}{\omega r_a},\ сек. \quad (14\text{-}232)$$

Значения основных параметров и постоянных времени явнополюсных машин приведены в табл. 14-12б.

Таблица 14-12б

Основные параметры и постоянные времени явнополюсных синхронных машин

Параметры (отн. ед.) и постоянные времени (*сек*)	Тип машины			
	Нормальные генераторы и двигатели (55—4 000 *ква*)		Гидрогенераторы (>4 000 *ква*) с успокоительной клеткой	Синхронные компенсаторы
	с успокоительной клеткой	без успокоительной клетки		
x_σ	0,07—0,15	0,065—0,15	0,10—0,19	0,15—0,22
x_d	1,7—1,0	1,7—1,0	1,6—0,6	1,7—2,2
x_q	1,0—0,6	1,0—0,6	1,0—0,4	1,1—1,3
x'_d	0,16—0,35	0,15—0,32	0,20—0,50	0,3—0,6
x''_d	0,1—0,19	—	0,13—0,24	0,18—0,28
x''_q	0,11—0,23	—	0,135—0,25	0,18—0,29
x_2	0,105—0,21	0,6—0,4	0,13—0,25	0,18—0,29
x_0	0,03—0,15	0,04—0,22	0,02—0,20	0,02—0,25
r_a	0,05—0,008	0,05—0,008	0,008—0,0035	0,007—0,0045
$r_в$	0,007—0,002	0,008—0,002	0,002—0,0003	0,002—0,0006
T_{d0}	0,8—2,5	0,6—2,4	2—9	5—14
T'_d	0,08—1,5	0,07—1,4	0,8—2,5	1—2,8
T''_d	0,005—0,06	—	0,01—0,08	0,02—0,08
T_a	0,01—0,2	0,04—0,4	0,03—0,35	0,1—0,3
$T_{мех}$	0,1—3,5	—	3—8	1—3

Примечание. Формулы для активных сопротивлений дают значения их при 75° С. Формулы для индуктивных сопротивлений составлены без учета насыщения. Насыщение от полей рассеяния при больших токах можно с некоторым приближением учесть, умножая полученные по формулам значения x'_d, x''_d и x''_q на опытный коэффициент (0,88—0,91). В формулах для постоянных времени $\omega=2\pi f=314$ при $f=50$ *гц*.

б) **Турбогенераторы.** Параметры (отн. ед.) и постоянные времени (*сек*) турбогенератора определяются по приведенным ниже формулам.

Активное сопротивление обмотки статора

$$r_а = r_{175} = \frac{1}{46}\frac{w_1 l_{ср}\cdot 10^{-2}}{a_1 s_1}\frac{I_н}{U_н}, \text{ отн. ед.,} \quad (14\text{-}232а)$$

где

$$l_{ср} = 2(l_1 + l_{л1}), \text{ см}$$

при $l_{л1}$ — по (14-67).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_σ, отн. ед. — по (14-62).

Индуктивное сопротивление взаимной индукции:

по продольной оси

$$x_{ad} = \frac{k_a F_a}{F_{\delta 0}}, \text{ отн. ед.,} \quad (14\text{-}233)$$

где k_a — по (14-160); F_a — по (14-159); $F_{\delta 0}$ — магнитное напряжение зазоров при $E_0 = U_н$;

по поперечной оси

$$x_{aq} \approx 0{,}9 x_{ad}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}234)$$

Синхронные индуктивные сопротивления x_d и x_q — по (14-194) и (14-195).

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_в = \sigma x_{ad}, \text{ отн. ед ,} \quad (14\text{-}235)$$

где (рис. 14-43)

$$\sigma \approx 1{,}02 + \frac{6{,}38 k_a F_{\delta 0} l_2}{\Phi_0 Z_2}\left(\frac{h_{12}}{3b_{п2}} + \frac{h_4^г}{b_{п2}}\right). \quad (14\text{-}236)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения $x_{в\sigma}$ — по (14-201).

Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси x'_d — по (14-216).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x''_d \approx x_\sigma + 0{,}025, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}237)$$

Индуктивное сопротивление обратной последовательности

$$x_2 \approx 1{,}22 x''_d, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}238)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности

$$x_0 = k_x \frac{2l'_\delta}{Z_1 b_{п1}}\left[(3\beta - 2)h_4 + (9\beta - 5)\frac{h_{11}}{12} - (9\beta - 8)\frac{h_{22}}{12}\right] + 1{,}57 x_{ad}\left(\beta - \frac{2}{3}\right)\frac{1}{k_a k_{о1}^2}\left[\left(\frac{2}{Z_1}\right)^2 + 0{,}037 + 0{,}39\left(\beta - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta - \frac{2}{3}\right)^2\right], \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}239)$$

при $\beta = \frac{y}{\tau} \geqslant \frac{2}{3}$;

$$x_0 = k_x \frac{2l'_\delta}{Z_1 b_{п1}}\left[(2 - 3\beta)h_4 + (7 - 9\beta)\frac{h_{11}}{12} - (4 - 9\beta)\frac{h_{22}}{12}\right] + 1{,}57 x_{ad}\left(\frac{2}{3} - \beta\right)\frac{1}{k_a k_{о1}^2}\left[\left(\frac{2}{Z_1}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{3} - \beta\right) - \left(\frac{2}{3} - \beta\right)^2\right], \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}240)$$

при $\beta = \frac{y}{\tau} < \frac{2}{3}$ [размеры h_4, h_{11}, h_{22} — см. рис. 14-21; k_x — по (14-65); l'_δ — по (14-66)].

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора

$$T'_{d0} \approx \frac{1}{0{,}75}\frac{2w_2 k_{о2}\sigma\Phi_0\cdot 10^{-8}}{r_{2(75)} I_{в\delta}}, \text{ сек,} \quad (14\text{-}241)$$

где величина $2w_2 k_{о2}\sigma\Phi_0\cdot 10^{-8}$ приблизительно равна полному потокосцеплению обмотки возбуждения при токе

$$I_{в\delta} = \frac{F_{\delta 0}}{2w_2}, \text{ а;} \quad (14\text{-}242)$$

обмоточный коэффициент ротора

$$k_{o2} = \frac{2\sin\gamma\frac{\pi}{2}}{Z_2 \sin\frac{\pi}{Z_2'}} \approx$$

$$\approx \frac{2\sin\gamma\frac{\pi}{2}}{\gamma\pi}; \qquad (14\text{-}243)$$

коэффициент 1/0,75 приближенно учитывает увеличение рассматриваемой постоянной времени T'_{d0} из-за возникновения при переходных процессах вихревых токов в массивном роторе, контуры которых индуктивно связаны с обмоткой возбуждения и имеют относительно малые активные сопротивления.

Постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке статора:

при трехфазном коротком замыкании

$$T'_{d3} = T'_{d0}\frac{x'_d}{x_d}, \text{ сек}; \qquad (14\text{-}244)$$

при двухфазном коротком замыкании

$$T'_{d2} = T'_{d0}\frac{x'_d + x_2}{x_d + x_2}, \text{ сек}; \qquad (14\text{-}245)$$

при однофазном коротком замыкании

$$T'_{d1} = T'_{d0}\frac{x'_d + x_2 + x_0}{x_d + x_2 + x_0}, \text{ сек}. \qquad (14\text{-}246)$$

Постоянная времени затухания периодической составляющей свободного тока сверхпереходного процесса при всех видах короткого замыкания

$$T''_d = T''_{d3} \approx T''_{d2} \approx T''_{d1} \approx$$

$$\approx \frac{1}{8}T'_{d3}, \text{ сек}. \qquad (14\text{-}247)$$

Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания

$$T_{a3} = \frac{x_2}{314 r_{1(75)}}, \text{ сек}; \qquad (14\text{-}248)$$

тока двухфазного короткого замыкания

$$T_{a2} \approx T_{a3} = T_a, \text{ сек}; \qquad (14\text{-}249)$$

тока однофазного короткого замыкания

$$T_{a1} = \frac{2x_2 + x_0}{3\cdot 314 r_{1(75)}}, \text{ сек} \qquad (14\text{-}250)$$

(влияние насыщения приближенно можно учесть, умножив T_{a3}, T_{a2}, T_{a1} на 0,8).

Значения параметров и постоянных времени современных крупных турбогенераторов (3 000 *об/мин*) приведены в табл. 14-13.

Таблица 14-13

Параметры (отн. ед.) и постоянные времени (*сек*) современных крупных турбогенераторов завода «Электросила»

Параметры и постоянные времени	ТВ2-150-2	ТВФ-100	ТВФ-200	ТВВ-165	ТВВ-200	ТВВ-300
$P_н$, *Мвт*	150	100	200	165	200	300
$\cos\varphi_н$	0,9	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$B_{\delta 0}$, *гс*	8 100	8 200	8 340	8 120	8 500	8 475
A, *а/см*	766	1 095	1 160	1 425	1 335	1 380
x_d	1,487	1,780	1,875	1,880	1,840	1,700
x'_d	0,180	0,282	0,250	0,330	0,273	0,257
x''_d	0,122	0,183	0,165	0,230	0,190	0,172
x_q	$\sim 0{,}9\,x_d$	$\sim 0{,}9\,x_d$	$\sim 0{,}9\,x_d$	$\sim 0{,}9\,x_d$	$\sim 0{,}9\,x_d$	$\sim 0{,}9\,x_d$
x_2	$\sim 1{,}22\,x''_d$	$\sim 1{,}22\,x''_d$	$\sim 1{,}22\,x''_d$	$\sim 1{,}22\,x''_d$	$\sim 1{,}22\,x''_d$	$\sim 1{,}22\,x''_d$
T_a	0,422	0,417	0,513	0,400	0,327	0,367
T'_d	1,44	0,970	0,920	0,920	0,935	0,900
T''_d	0,18	0,12	0,115	0,115	0,117	0,114
$T_{мех}$	4,41	2,71	2,74	2,24	2,19	2,07

14-11. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

В конце электромагнитного расчета должны быть определены основные характеристики машины, ее потери и к. п. д. Все это наряду с определением превышений температуры ответственных частей машины позволяет проверить, правильно ли выбраны ее размеры и электромагнитные нагрузки. Часто бывает достаточным определение только отдельных точек характеристик.

а) **Изменение напряжения генератора.** Под изменением напряжения генератора понимается повышение напряжения на его зажимах при переходе от режима работы с номинальной нагрузкой к режиму холостого хода и при сохранении неизменными тока возбуждения и скорости вращения. Это повышение напряжения выражают в долях или процентах номинального напряжения:

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_н}{U_н} \cdot 100\%. \qquad (14\text{-}251)$$

Для явнополюсных машин при $\cos\varphi_н = 0{,}8$ $\Delta U\%$ обычно не превышает 30—35%, а для турбогенераторов при $\cos\varphi_н = 0{,}8$ достигает 40—45%.

Значение $U_0 = E_0$ определяется по характеристике холостого хода для номинальной н. с. $F_{в.н}$ (или соответствующего ей тока $I_{в.н}$) обмотки возбуждения, которая находится, как указывалось, при помощи векторной диаграммы.

б) **Регулировочные, внешние и V-образные характеристики генератора.** Для построения регулировочной характеристики надо задаться значениями тока статора I при $U = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$ и найти при помощи векторных диаграмм соответствующие им значения тока возбуждения $I_в$. Если требуется построить регулировочную характеристику при $U_н = \text{const}$ и $\cos\varphi_н = \text{const}$, то достаточно найти две-три промежуточные точки (при $I < I_н$), так как ее крайние точки $I_{в0}$ при $I = 0$ и $I_{в.н}$ при $I = I_н$ известны из расчета машины.

Внешние характеристики могут быть построены при помощи регулировочных характеристик. Если внешняя характеристика должна быть построена при $I_{в.н} = \text{const}$ и $\cos\varphi_н = \text{const}$, то ее две точки $U_н$ при $I = I_н$ и U_0 при $I = 0$ известны. Для определения промежуточных точек надо построить две-три регулировочные характеристики при $U_н < U < U_0$ (достаточно взять небольшие пределы изменения I) и провести прямую линию от $I_{в.н}$, параллельную оси абсцисс. Точки пересечения этой линии с регулировочными характеристиками для различных U дают, следовательно, значения U при соответствующих токах I.

V-образные кривые также могут быть построены при помощи векторных диаграмм.

в) **V-образные кривые и рабочие характеристики двигателя.** V-образные кривые целесообразно построить при постоянной мощности на зажимах двигателя, $P_1 = \text{const}$. Приближенно точки их определяются при помощи векторной диаграммы Потье или более точно — при помощи векторной диаграммы Блонделя.

Рабочие характеристики двигателя I, $\cos\varphi$, η, $P_1 = f(P_2)$ при $U_н = \text{const}$ и $I_{в.н} = \text{const}$ могут быть найдены при помощи V-образных кривых. Эти кривые показаны на рис. 14-51. Здесь точки пересечения прямой (сплошная линия), проведенной через $I_{в.н}$, с V-образными кривыми позволяют определить $P_1 = mU_н I\cos\varphi$, I, $\cos\varphi$, $P_2 = P_1 - \Sigma P$ и $\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$, где ΣP — потери машины при данном режиме ее работы.

При помощи V-образных кривых могут быть также найдены рабочие характеристики двигателя с «компаундированным» возбуждением, которое осуществляется при помощи выпрямителей и трансформатора последовательного включения (трансформатора тока). В этом случае добавочный ток возбуждения изменяется пропорционально току статора. Если провести прямую (пунктирная линия на рис. 14-52), соответствующую изменению добавочного тока возбуждения, то точки ее пересечения с V-образными кри-

выми, как и в предыдущем случае, позволяют определить рабочие характеристики двигателя.

Статические характеристики синхронных машин могут быть также приближенно определены при помощи простой векторной диаграммы, учитывающей насыщение машины в той же мере, как и диаграмма Потье.

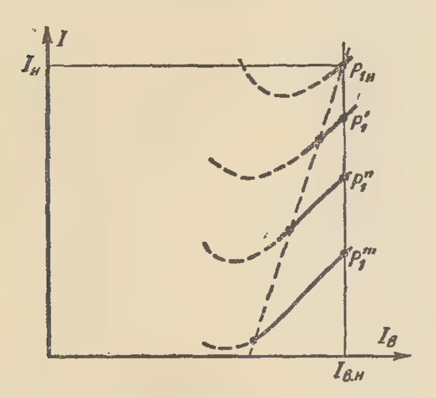


Рис. 14-51. К построению рабочих характеристик синхронного двигателя.

Для неявнополюсной машины она дает более точные результаты, чем для явнополюсной. Но с некоторым приближением, как показывает опыт, ее можно применять и для явнополюсной машины, причем в этом случае результаты получаются тем точнее, чем меньше cos φ, при котором работает машина.

Построение указанной диаграммы показано на рис. 14-52, где слева представлены характеристики холостого хода, а справа — диаграмма Потье и соответствующая ей векторная диаграмма. Здесь обозначены:

(E_0) — действительная характеристика холостого хода;

$(E_{0н}'')$ — спрямленная в точке E_r характеристика;

(E_0'') — характеристика ненасыщенной машины («характеристика воздушного зазора»);

U и I — напряжение и ток машины;

$F_в$, F_a' и F_r — н. с. соответственно обмотки возбуждения, обмотки якоря (приведенная к обмотке возбуждения) и результирующая;

$x_р$ — расчетное индуктивное сопротивление ($x_р \approx x_\sigma$ +0,02 отн. ед.; при работе машины с недовозбуждением можно принять $x_р \approx \approx x_\sigma$);

$x_{с.н} = x_{aн} + x_р$ — индуктивное сопротивление (приблизительно равное синхронному сопротивлению по продольной оси) с учетом насыщения;

$E_{0н}'$ — э. д. с. по спрямленной в точке E_r характеристике для данного тока возбуждения $I_в$ (или н. с. $F_в$),

$$E_{0н}' = E_0' \frac{E_r}{E_r'}; \quad x_{aн} = x_a \frac{E_r}{E_r'};$$

$$E_0' = U^* \frac{I_в}{I_{в0}}, \qquad (14\text{-}252)$$

где $x_a = x_{ad}$ — ненасыщенное значение индуктивного сопротивления реакции якоря по продольной оси (остальные величины — см. рис. 14-52).

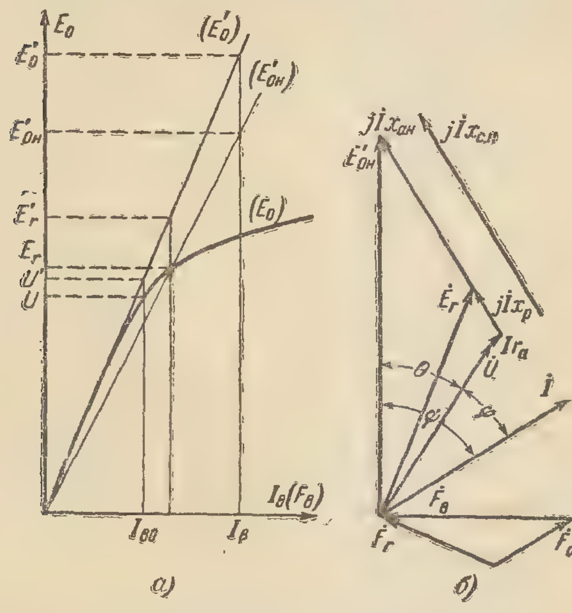


Рис. 14-52. Характеристики холостого хода, диаграмма Потье и соответствующая ей векторная диаграмма (без векторов н. с.).

Представленная на рис. 14-52 векторная диаграмма, как и диаграмма Потье, учитывает насыщение машины, которое в основном зависит от э. д. с. E_r. Она позволяет составить формулы для расчета характеристик генератора и двигателя. Для их упрощения можно принять $r_a = 0$, что допустимо примерно при $P_н > 30 \div 50$ *квт*. Формулы составляются на основе уравнений, вытекающих из векторной диаграммы:

$$E_r^2 = (U \sin\varphi + Ix_р)^2 + (U \cos\varphi + Ir_a)^2 = U^2 + 2UI(x_р \sin\varphi + r_a \cos\varphi) + I^2 x_р^2; \qquad (14\text{-}253)$$

$$E_{0н}'^2 = (U \sin\varphi + Ix_{с.н})^2 + (U \cos\varphi + Ir_a)^2 = U^2 + 2UI(x_{с.н} \sin\varphi + r_a \cos\varphi) + I^2 x_{с.н}^2; \qquad (14\text{-}254)$$

при $r_a = 0$

$$I \cos\varphi = \frac{E_{0н}' \sin\Theta}{x_{с.н}}; \qquad (14\text{-}255а)$$

$$I \sin\varphi = \frac{E_{0н}' \cos\Theta - U}{x_{с.н}}. \qquad (14\text{-}255б)$$

По приведенным формулам могут быть найдены точки **регулировочной характеристики**. Для этого нужно задаться несколькими значениями тока статора и для каждого из них графически (рис. 14-52, *б*) или аналитически [согласно (14-253)] определить E_r; затем, как показано на рис. 14-52, *а*, найти E_r' и рассчитать $x_{a\text{н}}=x_a\frac{E_r}{E_r'}$ и $x_{\text{с.н}}=x_{a\text{н}}+x_\text{р}$. После этого графически (рис. 14-52, *б*) или аналитически [согласно (14-254)] определяется $E_{0\text{н}}'$ и затем $E_0''=E_{0\text{н}}'\frac{E_r'}{E_r}$ и $I_\text{в}=I_{\text{в}0}\frac{E_0''}{U'}$.

Для генератора при $\varphi<0$ регулировочные характеристики следует определять обычным методом — при помощи диаграммы Потье.

Внешняя характеристика, как указывалось, может быть построена по регулировочным характеристикам. К этому методу следует обратиться в случае работы генератора с опережающим током при $\cos\varphi>0$.

Точки внешней характеристики можно также найти путем расчета по формулам, которые получаются из (14-253) и (14-254), если сюда подставить $U=Iz$, где z — сопротивление нагрузки. Оно получается равным:

$$z=\frac{p+\sqrt{p^2+sq}}{s}, \qquad (14\text{-}256)$$

где

$$\left.\begin{aligned} &s=1-u^2 \text{ при } u=\frac{E_r}{E_{0\text{н}}'};\\ &p=(u^2x_{\text{с.н}}-x_\text{р})\sin\varphi-\\ &\quad -sr_a\cos\varphi;\\ &q=u^2z^2_{\text{с.н}}-z^2_\text{р} \text{ при } z^2_{\text{с.н}}=\\ &\quad =x^2_{\text{с.н}}+r_a^2 \text{ и } z_\text{р}^2=x_\text{р}^2+r_a^2. \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}257)$$

При $r_a=0$ имеем:

$$p=(u^2x_{\text{с.н}}-x_\text{р})\sin\varphi;$$

$$q=u^2x^2_{\text{с.н}}-x^2_\text{р}. \qquad (14\text{-}258)$$

Ток статора

$$I=\frac{E_r}{\sqrt{z^2+2z\left(x_\text{р}\sin\varphi+r_a\cos\varphi\right)+x_\text{р}^2}}. \qquad (14\text{-}259)$$

Напряжение

$$U=Iz. \qquad (14\text{-}260)$$

Расчеты рекомендуется производить для величин в относительных единицах при их базисных значениях: $I_\text{б}=I_\text{н}$; $U_\text{б}=U_\text{н}$; $z_\text{б}=U_\text{н}/I_\text{н}$, где $I_\text{н}$ и $U_\text{н}$ — номинальные значения тока и напряжения.

При определении внешней характеристики надо задаться несколькими значениями E_r в пределах, которые зависят от $I_\text{в}$ и $\cos\varphi$. Если, например, заданы номинальные значения $I_{\text{в.н}}$ и $\cos\varphi_\text{н}$ ($\varphi_\text{н}>0$) и известно $U_\text{н}$ при $I_\text{н}$, то E_r будет изменяться в пределах $E_{r\text{н}}—U_0$, где $E_{r\text{н}}$ — э. д. с. при номинальном режиме, а U_0 — напряжение при холостом ходе и токе возбуждения $I_{\text{в.н}}$ (если требуется найти U при $I>I_\text{н}$, то следует взять $E_r<E_{r\text{н}}$). Затем для каждого значения E_r надо найти соответствующее значение E_r', рассчитать, как указывалось, $x_{a\text{н}}$, $x_{\text{с.н}}$ и $E_{0\text{н}}''$ и после этого u, s, p, q, z, I и U.

Формулы для расчета внешних характеристик при $\cos\varphi=1$ и при $\cos\varphi=0$ (при $\sin\varphi=1$ или $\sin\varphi=-1$, т. е. для отстающего или опережающего тока) и при $r_a=0$ упрощаются:

при $\cos\varphi=1$ ($\sin\varphi=0$)

$$z=\sqrt{\frac{u^2x^2_{\text{с.н}}-x^2_\text{р}}{1-u^2}};$$

$$I=\frac{E_r}{\sqrt{z^2+x_\text{р}^2}}; \qquad U=Iz; \qquad (14\text{-}261)$$

при $\cos\varphi=0$ ($\sin\varphi=1$)

$$z=-x_\text{р}+x_{a\text{н}}\frac{u}{1-u};$$

$$I=\frac{E_r}{z+x_\text{р}}; \quad U=Iz; \qquad (14\text{-}262)$$

при $\cos\varphi=0$ ($\sin\varphi=-1$)

$$z=x_\text{р}-x_{a\text{н}}\frac{u}{1-u};$$

$$I=\frac{E_r}{z-x_\text{р}}; \qquad U=Iz. \qquad (14\text{-}263)$$

Результаты расчетов следует свести в таблицу.

При определении **рабочих характеристик синхронного двигателя** [I, $\cos\varphi$, η, $P_1=f(P_2)$ при $U=\text{const}$ и $I_\text{в}=\text{const}$)] также следует задаться несколькими значениями E_r, найти соответствующие им значения E_r', рассчитать $E_{0\text{н}}'=\frac{E_r}{E_r'}E_0'$ [E_0' определяется для заданного $I_\text{в}$ согласно (14-252)], $x_{a\text{н}}$ и $x_{\text{с.н}}$. После этого можно определить ток статора и $\sin\varphi$:

$$I=\sqrt{\frac{E_{0\text{н}}'^2}{x_{a\text{н}}x_{\text{с.н}}}-\frac{1}{x_\text{р}}\left(\frac{E_r^2}{x_{a\text{н}}}-\frac{U^2}{x_{\text{с.н}}}\right)}; \qquad (14\text{-}264)$$

$$\sin\varphi=-0{,}5\left[\frac{E_r^2}{UIx_\text{р}}-\left(\frac{U}{Ix_\text{р}}+\frac{Ix_\text{р}}{U}\right)\right]. \qquad (14\text{-}265)$$

Далее определяются $\cos\varphi$, $P_1=m_1UI\cos\varphi$, $P_2=P_1-\Sigma P$ и $\eta=1-\frac{\Sigma P}{P_1}$, где ΣP — сумма потерь, которая состоит из по-

терь холостого хода P_0, основных электрических потерь $P_э$, добавочных потерь при нагрузке $P_{доб}$ и потерь на возбуждение $P_в = U_в I_в \frac{1}{\eta_в}$. Можно принять $P_0 = \text{const}$ и $P_э + P_{доб} \equiv I^2$.

Пределы, в которых изменяется э. д. с. $E_г$, зависят от U, $I_в$ и $\cos\varphi$ при $I = I_н$. Обычно рабочие характеристики синхронного двигателя определяются для $U_н$ и тока возбуждения $I_{в.н}$ при номинальном режиме работы ($\cos\varphi_н$ при $\varphi_н < 0$). В этом случае можно найти $E_{гн}$ при данном $\cos\varphi_н$ и $I_н = \frac{P_{2н}}{m_1 U_н \eta \cos\varphi_н}$ (к. п. д. η следует предварительно взять по данным выполненных машин).

Значения $E_г$ в небольшой степени возрастают по сравнению с $E_{гн}$ при $P_2 < P_{2н}$ и уменьшаются при $P_2 > P_{2н}$, если $\cos\varphi_н$ соответствует опережающему току.

Рекомендуется вначале определить I и $\sin\varphi$, подставляя в (14-264) и (14-265) все величины в относительных единицах. Результаты расчетов целесообразно свести в таблицу:

$E_г/E'_г$	$x_{ан}$	$x_{с.н}$	$E'_{0н}$	I	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	P_1	ΣP	P_2	η

Рабочие характеристики синхронного двигателя можно также с некоторым приближением определить при помощи круговой диаграммы Она показана на рис. 14-53, где $\overline{AO} = U/x_{с.н}$, $\overline{OB} = E'_{0н}/x_{с.н}$ (радиус круговой диаграммы). Из диаграммы следует брать токи и соответствующие им $\cos\varphi$; другие величины (P_1, ΣP, P_2, η) должны быть рассчитаны.

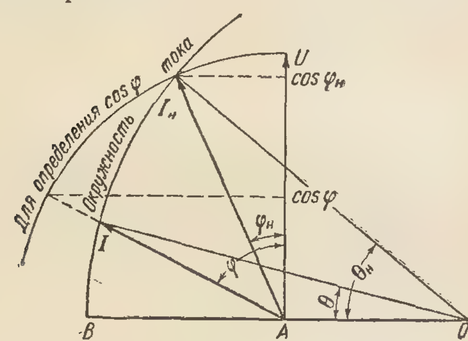


Рис. 14-53. К определению рабочих характеристик синхронного двигателя по круговой диаграмме.

Для нормальных двигателей при $U_н$, $I_{в.н}$ и $\cos\varphi_н = 0{,}8 \div 0{,}9$ (при опережающем токе) можно взять величины $x_{с.н}$ и $E'_{0н}$, соответствующие номинальному режиму. Они остаются почти постоянными при переходе двигателя от номинальной нагрузки к холостому ходу. При других значениях U, $I_в$ надо по $I_в$ найти E'_0 и затем, предварительно оценив значение $E_г$, рассчитать $x_{с.н}$ и $E''_{0н}$. По полученным данным можно построить круговую диаграмму в первом приближении и по ней определить токи и $\cos\varphi$ для возможного режима двигателя. При этом проверяется правильность выбора значения $E_г$. Если найденное для тока и $\cos\varphi$ (взятых из круговой диаграммы) значение $E_г$ заметно отличается от предварительно выбранного, то следует снова рассчитать $x_{с.н}$ и $E''_{0н}$ и построить круговую диаграмму во втором приближении. Она может быть использована для приближенного определения рабочих характеристик двигателя при заданных значениях U и $I_в$.

Угловые характеристики [P_1, Q, I, $\cos\varphi = f(\theta)$ при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$] с учетом насыщения для неявнополюсных машин могут быть определены путем вычисления величин, указанных в приведенной выше таблице (за исключением ΣP, P_2 и η), и величин $Q = m_1 U I \sin\varphi$ и θ; при этом угол θ находится согласно (14-255а). Определение тех же характеристик с учетом насыщения для явнополюсных машин связано с большими затруднениями и требует кропотливых расчетов, в основу которых должен быть положен метод последовательных приближений.

г) Кратности установившихся токов короткого замыкания. Различают кратности токов короткого замыкания при «возбуждении холостого хода»

$$f_{к0} = \frac{I_{к0}}{I_н} \qquad (14\text{-}266)$$

и при номинальном возбуждении

$$f_{к.н} = \frac{I_{к.н}}{I_н}, \qquad (14\text{-}267)$$

где $I_{к0}$ — установившийся ток трехфазного короткого замыкания при возбуждении ($F_{в0}$ или $I_{в0}$), соответствующем э. д. с. при холостом ходе $E_0 = U_н$;

$I_{к.н}$ — установившийся ток трехфазного короткого замыкания при номинальном возбуждении ($F_{в.н}$ или $I_{в.н}$).

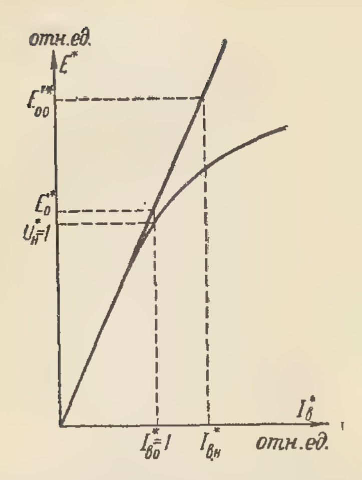


Рис. 14-54. Характеристика холостого хода (к определению кратностей токов короткого замыкания).

Большее практическое значение имеет величина $f_{к0}$, которую называют также отношением короткого замыкания и обозначают буквами ОКЗ:

$$f_{к0} = \text{ОКЗ}.$$

Значения $f_{к0}$ и $f_{к.н}$ могут быть определены по формулам:

$$f_{к0} = \frac{E_0'^*}{x_d^*}; \qquad (14\text{-}268)$$

$$f_{к.н} = \frac{E_{00}'^*}{x_d^*}, \qquad (14\text{-}269)$$

где $E_0'^*$ и $E_{00}'^*$ — значения э. д. с. (отн. ед.) по прямолинейной характеристике, совпадающей с начальной прямолинейной частью характеристики холостого хода, при $I_{в0}^*$ (=1) и $I_{в.н}^*$ (рис. 14-54);

x_d^* — ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси, отн. ед.

Значение $f_{к.н}$ можно также найти по соотношению

$$f_{к.н} = f_{к0}\, I_{вн.}^* \qquad (14\text{-}270)$$

В некоторых зарубежных странах (в том числе и в США) за ОКЗ принимается величина $1/x_d^*$ [она в литературе на английском языке обозначается через SCR (short circuit ratio)]. Обычно $E_0'^* = 1{,}08 \div 1{,}18$, и в соответствии с этим ОКЗ$=f_{к0}$ больше $1/x_d^*$ в 1,08—1,18 раза.

д) **Статическая перегружаемость.** Статическая перегружаемость, или кратность максимального вращающего момента (по отношению к номинальному) явнополюсных синхронных машин с учетом реактивного момента, определяется по формуле

$$S = M_м^* = \frac{E_{00}'^*}{x_d^* \cos\varphi_н} k = \frac{f_{к.н}}{\cos\varphi_н} k, \qquad (14\text{-}271)$$

где k в зависимости от $\varepsilon = \frac{x_d^* - x_q^*}{E_{00}'^* x_q^*}$ можно взять по рис. 14-55; $E_{00}'^* = E_0'^* I_{в.н}^*$.

Формула (14-271) получена на основе известного выражения для максимальной электромагнитной мощности $P_{эм.м}$ явнополюсной синхронной машины. При этом пренебрегалось активным сопротивлением обмотки статора r_a и не учитывалось насыщение машины, которое в основном зависит от э. д. с. $E_т$ (см. рис. 6-22). При максимальной электромагнитной мощности, соответствующей номинальному возбуждению и $U_н$, вектор тока статора опережает $\dot{U}_н$ в генераторном режиме работы и отстает относительно $\dot{U}_н$ в двигательном режиме работы. Поэтому $E_т < U_н$, что соответствует относительно слабому насыщению машины.

Активное сопротивление r_a оказывает обычно ничтожное влияние на $P_{эм.м}$ при $P_н > 20$ *квт*.

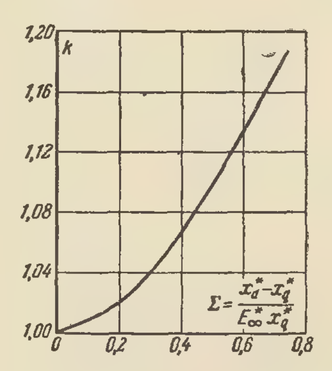


Рис. 14-55. К определению $S = M_м^*$.

Статическая перегружаемость гидрогенератора согласно ГОСТ 5616-63 вычисляется по формуле

$$S = \frac{i_{п}}{i_{к} \cos \varphi_{н}} \times$$
$$\times \left(1 + \frac{1}{6} \frac{i_0}{i_{п}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3}{2}\left(\frac{i_{п}}{i_0}\right)^2}}\right), \quad (14\text{-}272)$$

где $i_{п}$ — ток возбуждения при номинальной нагрузке, a;

i_0 — ток возбуждения при холостом ходе и $U_{н}$, a;

$i_{к}$ — ток возбуждения при трехфазном коротком замыкании и установившемся токе статора, равном номинальному, a.

При принятых нами обозначениях

$$i_{п} = I_{в.н}; \quad i_0 = I_{в0}; \quad i_{к} = I_{в0} \frac{1}{f_{к0}}.$$

Если выразить величины в (14-272) в относительных единицах при $I^*_{в0} = 1$, то получим:

$$S = \frac{f_{к.н}}{\cos \varphi_{н}} \times$$
$$\times \left(1 + \frac{1}{6} \frac{1}{I^*_{в.}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3}{2} I^{*2}_{в.н}}}\right). \quad (14\text{-}272а)$$

Полуэмпирическая формула (14-272) или (14-272 а) и формула (14-271) дают примерно одинаковые значения для S при $x_d/x_q = 1{,}70 \div 1{,}45$.

Статическая перегружаемость турбогенератора согласно ГОСТ 533-51 вычисляется по формуле

$$S = \frac{i_{п}}{i_{к} \cos \varphi_{н}} = ОКЗ \frac{i_{п}}{i_0 \cos \varphi_{н}} \quad (14\text{-}273)$$

или при принятых нами обозначениях по формуле

$$S = \frac{f_{к0} I^*_{в.н}}{\cos \varphi_{н}} = \frac{f_{к.н}}{\cos \varphi_{н}}. \quad (14\text{-}273а)$$

Для гидрогенераторов и турбогенераторов согласно указанным ГОСТ S должна быть не ниже 1,7.

Согласно ГОСТ 183-66 кратность максимального вращающего момента $M^*_{м}$ синхронного двигателя при $\cos \varphi_{н} = 0{,}9$ (опережающий ток) должна быть не ниже 1,65 при номинальных значениях напряжения, частоты и тока возбуждения и при соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы двигателя.

е) **Ударный ток короткого замыкания.** Ударным током короткого замыкания синхронной машины называется наибольшее возможное при данном возбуждении мгновенное значение тока ее якоря, которое получается при внезапном коротком замыкании на всех линейных ее зажимах.

Согласно ГОСТ 183-66 синхронная машина должна выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном 105% номинального.

Этот ток можно определить по формуле

$$i_{уд} = 1{,}8 \frac{1{,}05 \sqrt{2} U_{н}}{x''_d}, \ a. \quad (14\text{-}274)$$

Здесь коэффициент 1,8 приближенно учитывает апериодическую составляющую тока короткого замыкания, затухающую в соответствии с постоянной времени T_a.

Если величины в (14-274) выразить в относительных единицах, приняв за базисные единицы амплитуды номинальных тока и напряжения $(\sqrt{2} I_{н}$ и $\sqrt{2} U_{н})$, то получим:

$$i^*_{уд} = 1{,}8 \frac{1{,}05}{x''^*_d}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}274а)$$

Обычно для крупных машин $i^*_{уд} \leqslant 15$, т. е. не превышает 15-кратного значения амплитуды номинального тока.

Значение тока $i_{уд}$ определяет механические усилия, воздействующие на токоведущие части машины. Оно используется для расчета тангенциальных и радиальных электромагнитных сил, воздействующих на лобовые части обмотки статора и на их бандажи.

Для машин без успокоительной клетки в (14-274) и (14-274а) следует вместо x''_d и x''^*_d подставить x'_d и x'^*_d.

ж) **Вращающие моменты при коротких замыканиях.** При внезапном коротком замыкании возникают большие знакопеременные вращающие моменты, действующие на статор и ротор. Их максимальные значения определяются, как и ударный ток короткого замыкания, при напряжении холостого хода, равном 105% номинального.

Максимальный вращающий момент при трехфазном коротком замыкании

$$M_{кз} \approx \frac{1{,}05^2}{x_d''^*} M_н', \text{ кГ·м}; \quad (14\text{-}275)$$

здесь номинальный вращающий момент $M_н'$ определяется по полной номинальной мощности на зажимах машины $P_н$ *ква* при синхронной скорости вращения *n об/мин*:

$$M_н' = 973 \frac{P_н}{n}, \text{ кГ·м}. \quad (14\text{-}276)$$

При двухфазном коротком замыкании наряду с моментом, изменяющимся с основной частотой, возникает относительно большой момент, изменяющийся с двойной частотой. Максимум момента возникает, спустя приблизительно $^1/_3$ периода основной гармоники. Возникающий при этом максимальный момент

$$M_{к2} \approx 1{,}5 M_{кз}. \quad (14\text{-}277)$$

Момент $M_{к2}$, воспринимаемый ротором, лишь частично воздействует на вал, так как последний не закреплен. Момент $M_{к.в}$, воздействующий на вал, зависит от соотношения между маховым моментом $(GD^2)_м$ синхронной машины и внешним маховым моментом $(GD^2)_{вн}$ на ее валу. Под $(GD^2)_{вн}$ следует понимать маховый момент первичного двигателя в случае работы машины генератором или маховой момент рабочего механизма (машины-орудия) в случае работы машины двигателем.

С некоторым приближением можно принять

$$M_{к.в} \approx M_{к2} \frac{(GD^2)_{вн}}{(GD^2)_{вн} + (GD^2)_м}, \text{ кГ·м}. \quad (14\text{-}278)$$

При жестком корпусе статора момент $M_{к2}$ передавался бы фундаменту полностью. В действительности из-за упругости корпуса статора, особенно при его сварной конструкции, момент, действующий на фундамент, снижается до 70—40% момента $M_{к2}$. Практически обычно расчет фундаментных болтов на прочность производится по моменту $M_{кз}$.

При проектировании фундамента для крупной машины необходимо учитывать воздействие на него переменного момента. Собственная частота колебаний фундамента должна в достаточной степени отличаться от основной и двойной частоты сети.

з) **Пусковые характеристики синхронного двигателя.** Точный расчет пусковых характеристик синхронного двигателя встречает большие затруднения, так как требует громоздких вычислений и применения более точных, чем приведенные в § 14-10, методов расчета параметров.

Поэтому на практике применяются приближенные методы расчета пусковых характеристик и необходимых для этого параметров. Они дают отклонения от опытных данных, обычно не превышающие ±12%, а такие отклонения лежат в пределах допуска, установленного ГОСТ 183-66. Приближенные методы основаны на использовании схем замещения по продольной и поперечной осям машины, которые соответствуют ее общим уравнениям напряжений [Л. 115].

В соответствии с приближенными методами, применяемыми на заводах Советского Союза [Л. 108 и 116], в последующем приводятся расчетные формулы для результирующих полных сопротивлений машины, тока якоря и электромагнитного вращающего момента и указывается порядок расчета этих величин. Последние выражаются в относительных единицах, причем в их обозначениях звездочка (справа наверху) опускается.

П о л н о е с о п р о т и в л е н и е п о п р о д о л ь н о й о с и м а ш и н ы

$$Z_{ds} = jx_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{\frac{r'_в}{s} + jx_{в\sigma}} + \frac{1}{\frac{r_{yd}}{s} + jx_{y\sigma d}}}, \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}279)$$

здесь $r'_в = r_в(1+k)$, где k — кратность включенного в обмотку возбуждения сопротивления по отношению к ее собственному сопротивлению (обычно $k=8 \div 12$); s — скольжение.

Полное сопротивление по поперечной оси машины

$$Z_{qs} = jx_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\frac{r_{yq}}{s} + jx_{y\sigma q}}}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}280)$$

Ток якоря основной частоты $f_н$

$$\dot{I}' = \frac{U\left(Z_{ds} + Z_{qs} + \frac{2r_a}{2s-1}\right)}{(Z_{ds}+r_a)\left(Z_{qs} + \frac{r_a}{2s-1}\right) + (Z_{qs}+r_a)\left(Z_{ds} + \frac{r_a}{2s-1}\right)}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}281)$$

Этот ток при напряжении на зажимах U можно приближенно считать действительным пусковым током якоря машины с полной успокоительной клеткой, так как в этом случае Z_{ds} мало отличается от Z_{qs}.

Ток якоря частотой $(2s-1) f_н$

$$\dot{I}'' = \frac{U(Z_{qs} - Z_{ds})}{(Z_{ds}+r_a)\left(Z_{qs} + \frac{r_a}{2s-1}\right) + (Z_{qs}+r_a)\left(Z_{ds} + \frac{r_a}{2s-1}\right)}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}282)$$

Ток I'' имеет частоту $f_н$ только при $s=1$ и $s=0$; при других значениях s его частота отличается от $f_н$. Поэтому начальный пусковой ток (при $s=1$) в наихудшем случае при соответствующем положении оси полюсов относительно оси рассматриваемой фазы обмотки якоря будет равен арифметической сумме токов I' и I''

$$I_{нач} = I' + I'', \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}283)$$

При других скольжениях пусковой ток (его действующее значение)

$$I \approx \sqrt{I'^2 + I''^2}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}284)$$

Можно принять $I \approx I'$, так как обычно $I''^2 \ll I'^2$

Средний пусковой (асинхронный) момент

$$M = \left(UI'_a - I'^2 r_a + I''^2 \frac{r_a}{2s-1}\right) \times \frac{1}{\cos\varphi_н}, \text{ отн. ед.}, \quad (14\text{-}285)$$

где I'_a — активная составляющая тока $\dot{I}'$ (или действительная часть комплекса $\dot{I}'$).

Расчет токов по приведенным формулам требует большой вычислительной работы. Его можно упростить, приняв $r_a=0$, что во многих случаях допустимо, так как при $r_a<0{,}02 \div 0{,}03$ это дает ошибку по сравнению с более точными формулами (14-281) и (14-282), не превышающую обычно 3—5% [Л. 116]. При $r_a=0$ получим:

$$\dot{I}' = \frac{U(Z_{ds}+Z_{qs})}{2Z_{ds}Z_{qs}} = \frac{U}{2}\left(\frac{1}{Z_{ds}} + \frac{1}{Z_{qs}}\right), \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}286)$$

$$\dot{I}'' = \frac{U(Z_{qs}-Z_{ds})}{2Z_{ds}Z_{qs}} = \frac{U}{2}\left(\frac{1}{Z_{ds}} - \frac{1}{Z_{qs}}\right), \text{ отн. ед.}; \quad (14\text{-}287)$$

$$M = UI'_a \frac{1}{\cos\varphi_н}, \text{ отн. ед.} \quad (14\text{-}288)$$

Если рассчитываются пусковые характеристики при добавочном индуктивном сопротивлении $x_{доб}$ в це-

ни якоря (например, при реакторном пуске), то в формулы вместо x_σ нужно подставить $x_\sigma + x_{доб}$, где $x_{доб}$ — в относительных единицах. В этом случае U — напряжение до добавочного сопротивления $x_{доб}$ (до реактора).

Если сопротивление r_a велико или если необходимо учитывать сопротивления $r_л$ и $x_л$ линии от мощного источника тока до синхронного двигателя, то следует пользоваться более точными формулами (14 281)—(14-285), подставляя в них вместо r_a и x_σ величины $r_a + r_л$ и $x_\sigma + x_л$ и вместо U напряжение мощного источника тока.

Основными величинами, характеризующими пусковые свойства синхронного двигателя, являются начальный пусковой момент $M_{нач}$ (при $s=1$) и входной момент $M_{вх}$ (при $s=0{,}05$), а также начальный пусковой ток $I_{нач}$. Величины $M_{нач}$ и $M_{вх}$ зависят от выбора размеров пусковой клетки и материалов для ее стержней и колец.

Если необходимо получить повышенный начальный момент при большом времени пуска, то приходится выбирать для стержней латунь или бронзу (§ 11-), при этом входной момент несколько снижается.

При пуске в ход двигателя, не имеющего в цепи возбуждения добавочного сопротивления (при наглухо включенном возбудителе) заметно снижается $M_{вх}$ (при $s=0{,}05$). Поэтому такой пуск применяется для приводов, не требующих больших пусковых моментов. Расчет пусковых характеристик в этом случае производится по тем же формулам при замене $r'_в$ на $r_в$.

В новой серии синхронных двигателей предусматривается применение медных стержней для пусковой клетки, что по расчету дает $M_{нач} \geqslant 0{,}8$ и $M_{вх} \geqslant 0{,}8$. Эти значения во многих случаях удовлетворяют требованиям практики. Вхождение в синхронизм здесь может быть обеспечено и для тяжелых случаев пуска за счет надлежащей форсировки возбуждения.

Начальные пусковые токи для нормальных двигателей при $U=U_н$ обычно не превышают шестикратного значения номинального тока.

Определение параметров пусковой клетки по заданным $I_{нач}$ и $M_{нач}$ [Л. 117], как это иногда делается для короткозамкнутых асинхронных двигателей, требует усложненных расчетов.

Поэтому такая задача на практике решается путем подбора размеров клетки, так как уже после первого расчета становится очевидным, в какую сторону должны быть изменены эти размеры.

Расчеты пусковых характеристик рекомендуется производить в определенном порядке, сводя результаты расчетов в табл. 14-14, где приведены необходимые расчетные формулы для сопротивлений, составленные согласно (14-279) и (14-280), а также для токов и моментов, составленные согласно (14-286) — (14-288).

Рекомендуется задаваться значениями скольжения s, равными 1; 0,5; 0,3 (0,25); 0,1; 0,05. Часто ограничиваются расчетом моментов только при s, равном 1 и 0,05, а тока — только при $s=1$.

Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей с массивными полюсными наконечниками может быть выполнен по упрощенному методу с использованием схем замещения по продольной и поперечной осям машины и, следовательно, по тем же формулам, которые приведены в табл. 14-14. Но при этом параметры пусковой клетки должны быть заменены эквивалентными параметрами массивных полюсных наконечников. Они определяются значением эквивалентной глубины проникновения токов в массив наконечника, которое зависит от частоты скольжения и от значения токов. Указанный упрощенный метод изложен в [Л. 118].

Приближенные методы расчета пусковых характеристик синхронных двигателей, выполняемых с массивным цилиндрическим ротором по типу турбогенераторов и называемых синхронными турбодвигателями (СТД), изложены в [Л. 119].

Таблица 14-14

Расчет пусковых характеристик

$$r'_{вs} = r'_{в}/s$$

$$r_{yds} = r_{yd}/s$$

$$r_{yqs} = r_{yq}/s$$

$$Y_{ad} = -j\frac{1}{x_{ad}} = -jb_{ad}$$

$$Y_{вs} = \frac{r'_{вs} - jx_{в\sigma}}{r'^{2}_{вs} + x^{2}_{в\sigma}} = g_{вs} - jb_{вs}$$

$$Y_{yds} = \frac{r_{yds} - jx_{y\sigma d}}{r^{2}_{yds} + x^{2}_{y\sigma d}} = g_{yds} - jb_{yds}$$

$$Y'_{ds} = Y_{ad} + Y_{вs} + Y_{yds} = g'_{ds} - jb'_{ds}$$

$$Z_{ds} = jx_{\sigma} + \frac{g'_{ds} + jb'_{ds}}{g'^{2}_{ds} + b'^{2}_{ds}} = r_{ds} + jx_{ds}$$

$$Y_{aq} = -j\frac{1}{x_{aq}} = -jb_{aq}$$

$$Y_{yqs} = \frac{r_{yqs} - x_{y\sigma q}}{r^{2}_{yqs} + x^{2}_{y\sigma q}} = g_{yqs} - jb_{yqs}$$

$$Y'_{qs} = Y_{aq} + Y_{yqs} = g'_{qs} - jb'_{qs}$$

$$Z_{qs} = jx_{\sigma} + \frac{g'_{qs} + jb'_{qs}}{g'^{2}_{qs} + b'^{2}_{qs}} = r_{qs} + jx_{qs}$$

$$\dot{I}' = \frac{U}{2}\left(\frac{r_{ds} - jx_{ds}}{r^{2}_{ds} + x^{2}_{ds}} + \frac{r_{qs} - jx_{qs}}{r^{2}_{qs} + x^{2}_{qs}}\right) = \frac{U}{2}\left[(g_{ds} + g_{qs}) - j(b_{ds} + b_{qs})\right]$$

$$\dot{I}'' = \frac{U}{2}\left(\frac{r_{qs} - jx_{qs}}{r^{2}_{qs} + x^{2}_{qs}} - \frac{r_{ds} - jx_{ds}}{r^{2}_{ds} + x^{2}_{ds}}\right) = \frac{U}{2}\left[(g_{qs} - g_{ds}) - j(b_{qs} - b_{ds})\right]$$

$$I \approx \sqrt{I'^{2} + I''^{2}}$$

$$I'_{a} = \frac{U}{2}(g_{ds} + g_{qs})$$

$$M = UI'_{a}\frac{1}{\cos\varphi_{н}}$$

Примечание. Начальный пусковой ток (наибольший в одной из фаз при $s=1$) $I_{нач} = I' + I''$.

14-12. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

А. Расчет трехфазного синхронного генератора

Проектное задание. $P_н=500$ *квт*; $U_{н.л}=6\,300$ *в*; $\cos\varphi_н=0,8$ (отстающий ток); $f=50$ *гц*; $n_н=750$ *об/мин*; нормальная серийная машина защищенной конструкции с горизонтальным валом; радиальная вентиляция; продолжительный режим работы.

а) Номинальные величины

1. *Номинальное фазное напряжение* при соединении обмотки статора звездой

$$U_н=\frac{U_{н.л}}{\sqrt{3}}=\frac{6\,300}{\sqrt{3}}=3\,640\ в.$$

2. *Номинальная полная мощность*

$$S_н=\frac{P_н}{\cos\varphi_н}=\frac{500}{0,8}=625\ ква.$$

3. *Номинальный фазный ток*

$$I_н=\frac{S_н\cdot 10^3}{\sqrt{3}\,U_{н.л}}=\frac{625\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 6\,300}=57,3\ а.$$

б) Главные размеры

4. *Число пар полюсов*

$$p=\frac{60f}{n_н}=\frac{60\cdot 50}{750}=4.$$

5. *Расчетная мощность*

$$P'=\frac{k_E P_н}{\cos\varphi_н}=\frac{1,08\cdot 500}{0,8}=675\ ква.$$

6. По рис. 13-7 для $P'=675$ *ква* при $p=4$ предварительно находим $D\approx 72$ *см*. По (13-9) $D_a\approx 1,35\,D=1,35\cdot 72=97,2$ *см*. По табл. I-2 приложения I ближайший нормализованный внешний диаметр статора $D_a=99$ *см*.

7. *Внутренний диаметр статора*

$$D\approx\frac{1}{1,35}D_a=\frac{1}{1,35}\cdot 99=73,3\ см.$$

Возьмем $D=73$ *см*.

8. *Полюсное деление*

$$\tau=\frac{\pi D}{2p}=\frac{\pi\cdot 73}{8}=28,7\ см.$$

9. *Расчетная длина статора.* По рис. 14-1 для $\tau=28,7$ *см* при $p=4$ находим: $A=425$ *а/см*; $B_{\delta н}=8\,200$ *гс*. Выбираем $\alpha_p=\frac{b_p}{\tau}=0,73$ и $\delta_м/\delta=1,5$, чему по рис. 6-8, *а* соответствует $\alpha_\delta=0,68$ и $k_B=1,09$. Предварительно $k_{o1}=0,91$. Расчетная длина статора в первом приближении по (14-5)

$$l_\delta=\frac{6,1\cdot 10^{11}\,P'}{\alpha_\delta\,k_B\,k_{o1}\,AB_{\delta н}\,D^2\,n_н}=$$

$$=\frac{6,1\cdot 10^{11}\cdot 675}{0,68\cdot 1,09\cdot 0,91\cdot 425\cdot 8\,200\cdot 73^2\cdot 750}=44\ см.$$

10. *Действительная длина статора.* Предварительно $l_1\approx 1,08\ l_\delta=1,08\cdot 44=47,6$ *см*. Выбираем $n_в=8$ при $b_в=1$ *см*, $l_{пак}=4,5$ *см*. При этом получим:

$$l=l_{пак}(1+n_в)=4,5(1+8)=40,5\ см;$$

$$l_1=l+n_в b_в=40,5+8\cdot 1=48,5\ см;$$

$$l_\delta\approx l_1-0,5\,n_в b_в=48,5-0,5\cdot 8\cdot 1=44,5\ см;$$

$$\lambda=\frac{l_\delta}{\tau}=\frac{44,5}{28,7}=1,55.$$

При данных диаметрах D_a и D можно выполнить три машины на мощности $P_н$, равные 400, 500, 630 *квт* (см. табл. 14-3). Для них соответственно получим длины l_δ, примерно равные 35,6; 44,5, 56 *см* при λ, примерно равных 1,24; 1,55; 1,95 (ср. с рис. 14-5).

в) Обмотка, пазы и ярмо статора

11. Выбираем *двухслойную петлевую обмотку* при $q_1=3$.

12. *Общее число пазов*

$$Z_1=2pmq_1=8\cdot 3\cdot 3=72.$$

13. *Пазовое деление статора*

$$t_1=\frac{\pi D}{Z_1}=\frac{\pi\cdot 73}{72}=3,18\ см.$$

14. *Число эффективных проводников в пазу*

$$u_{п1}=\frac{At_1 a_1}{I_н}=\frac{425\cdot 3,18\cdot 1}{57,3}=23,6.$$

Возьмем $u_{п1}=24$; при этом $A=432$ *а/см*.

15. *Число витков фазы*

$$w_1=pq_1 u_{п1}\frac{1}{a_1}=4\cdot 3\cdot 24\cdot\frac{1}{1}=288.$$

16. *Шаг обмотки и обмоточные коэффициенты:*

$$y=7:\ \beta=\frac{y}{\tau}=\frac{7}{9}=0,778;\quad k_{o1}=0,902;$$

$$k_у=0,94\ (\text{приложение VIII}).$$

17. *Магнитный поток в зазоре при холостом ходе*

$$\Phi_0=\frac{U_н\cdot 10^8}{4k_B f w_1 k_{o1}}=$$

$$=\frac{3\,640\cdot 10^8}{4\cdot 1,09\cdot 50\cdot 288\cdot 0,902}=6,42\cdot 10^6\ мкс;$$

при номинальной нагрузке (предварительно)

$$\Phi_н=1,08\,\Phi_0=1,08\cdot 6,42\cdot 10^6=6,95\cdot 10^6\ мкс.$$

18. *Индукции в зазоре:*

$$B_{\delta 0}=\frac{\Phi_0}{\alpha_\delta\,\tau l_\delta}=\frac{6,42\cdot 10^6}{0,68\cdot 28,7\cdot 44,5}=7\,380\ гс;$$

$$B_{\delta н}=1,08\,B_{\delta 0}=1,08\cdot 7\,380\approx 8\,000\ гс.$$

19. *Размеры проводника, изоляции и паза статора.* При плотности тока $\Delta_c\approx 5$ *а/мм²* сечение проводника

$$s_c' \approx \frac{I_н}{\Delta_c} = \frac{57,3}{5} = 11,46\ мм^2.$$

Ширина паза $b_{п1} \approx 0,47 t_1 = 0,47 \cdot 31,8 \approx \approx 15$ *мм*.

По ширине паза укладываем один проводник. По табл. VII-9 толщина пазовой изоляции по ширине с припуском на штамповку равна 6,0 *мм*; при этом на изолированный провод приходится 15—6=9 *мм*. Возьмем провод марки ППЛБО, имеющий толщину изоляции 0,45 *мм* (табл. IV-4); следовательно, на ширину голой меди остается 9—0,45= =8,55 *мм*. По табл. IV-2 выбираем провод с

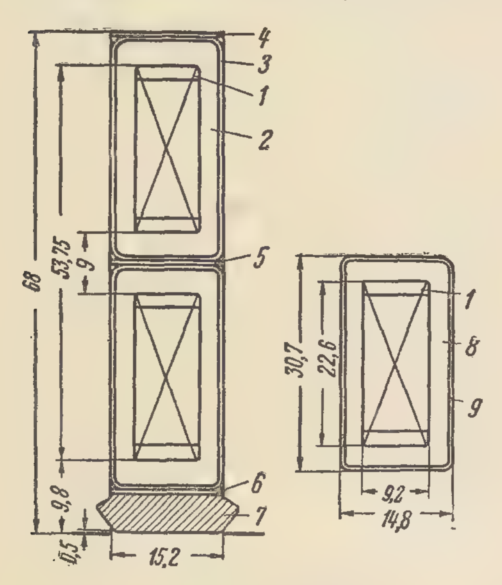


Рис. 14-56.

размерами: $s_c = 11,40$ *мм*²; $a \times b = 1,35 \times \times 8,6$ *мм·мм*. Плотность тока $\Delta_c = \frac{57,3}{11,4} = =5,02$ *а/мм*². По высоте паза укладываем 24 проводника (по 12 проводников на катушечную сторону). Размеры катушечной стороны без корпусной изоляции по (4-9):

$$B = (8,6+0,45)\,1 + 0,075 \cdot 1 + 0,1 = 9,225\ мм;$$

$$H = (1,35 + 0,45)\,12 + 0,075 \cdot 12 + + 0,1 = 22,6\ мм.$$

Корпусную изоляцию выполняем согласно табл. VII-9; при этом по ширине на укладку и штамповку берем 0,6 *мм*.

Ширина паза

$$b_{п1} = B + 5,7 + 0,3 = 9,2 + 6,0 = 15,2\ мм.$$

Высота паза

$$h_{п1} = 2H + 17,9 + 4,9 = 68\ мм.$$

(На рис. 14-56 представлены паз, лобовая часть обмотки и указаны их основные размеры; в табл. 14-15 приведена спецификация паза и указана изоляция лобовой части обмотки.)

20. *Ширина коронки зубца*

$$b_{z1} = t_1 - b_{п1} = 3,18 - 1,52 = 1,66\ см.$$

21. *Индукция в коронке зубца*

$$B_{z1м} = \frac{B_{\delta н}\, t_1\, l_\delta}{b_{z1}\, l k_c} = \frac{8\,000 \cdot 3,18 \cdot 41,5}{1,66 \cdot 40,5 \cdot 0,93} = = 18\,050\ гс.$$

22. *Высота ярма статора*

$$h_c = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} = \frac{99 - 73}{2} - - 6,8 = 6,2\ см.$$

23. *Индукция в ярме статора*

$$B_c = \frac{\Phi_н}{2h_c\, l k_c} = \frac{6,95 \cdot 10^6}{2 \cdot 6,2 \cdot 40,5 \cdot 0,93} = 14\,800\ гс.$$

24. *Температурный перепад в пазовой изоляции* по (14-41)

$$\Theta_и = \frac{\Delta_c A k_f}{4\,200}\;\frac{t_1}{2\,(b_{п1} + h_{п1} - h_к)}\;\frac{\delta_{и1}}{\lambda_и} = \frac{5,02 \cdot 432 \cdot 1}{4\,200} \cdot \frac{3,18}{2\,(1,52 + 6,8 - 0,5)} \times \times \frac{0,33}{0,0016} = 21,5°\,C$$

$$\Big[k_f \approx 1 \text{ при } a = 1,35\ мм;$$

$$\delta_{и1} = 0,1\,\frac{6 + (B - b)}{2} = = 0,1\,\frac{6 + (9,2 - 8,6)}{2} = 0,33\ см\Big].$$

25. *Градиент температуры в пазовой изоляции* по (14-42)

$$\Delta\Theta_и = \frac{\Theta_и}{\delta_{и1}} = \frac{21,5}{0,33} = 65°\,C/см.$$

26. *Длина лобовой части обмотки статора* по (4-17)

$$l_{л1} = A + 1,57\,H + 2M + N = 28,9 + + 1,57 \cdot 2,26 + 2 \cdot 4,5 + 8 = 49,4\ см$$

[по (4-18)

$$\tau_y = \frac{\pi\,(D + 2H + a_3)}{2p}\,\beta = = \frac{\pi\,(73 + 2 \cdot 2,26 + 2,5)}{8} \cdot 0,778 = 24,4\ см;$$

$$t_c = \frac{\pi\,(D + a_2)}{Z_1} = \frac{\pi\,(73 + 1,75)}{72} = 3,26\ см;$$

$$f_c = B + a_1 = 0,92 + 1,2 = 2,12\ см \text{ при}$$

$$a_1 = \Delta_1 + \Delta_2 = 0,58 + 0,62 = 1,2\ см;$$

$$A = \frac{\tau_y - R - 0,5\,H}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_c}\right)^2}} = = \frac{24,4 - 1,5 - 0,5 \cdot 2,26}{\sqrt{1 - \left(\frac{2,12}{3,26}\right)^2}} = 28,9\ см.]$$

Таблица 14-15

Непрерывная компаундированная изоляция обмотки статора. Класс А. Нормальное исполнение

Часть обмотки		Позиция на рис. 14-56	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Толщина изоляции, *мм*: по ширине	Толщина изоляции, *мм*: по высоте
Пазовая	На катушечную сторону	*1*	Провод ППЛБО; s_c=11,4 *мм*²; $a\times b/a_{из}\times b_{из}$=1,35×8,6/1,8×9,05					
		2	Микалента	0,17	7 слоев вполнахлеста		4,7	4,7
		3	Лента тафтяная	0,25	1 слой встык		0,5	0,5
			Разбухание от компаундирования	—	—		0,2	2,25
			Толщина изоляции	—	—		5,4	7,45
	На паз	*4*	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5
		5	То же	1,0	—	1	—	1,0
		6	»	0,5	—	1	—	1,0
			Припуск на укладку и штамповку	—	—	—	0,6	0,5
			Всего на паз без клина	—	—	—	6,0	17,9
Лобовая	На катушечную сторону	*8*	Микалента	0,17	6 слоев вполнахлеста		4,1	4,1
		9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0
			Разбухание от компаундирования	—	—		0,5	3,0
			Толщина изоляции	—	—		5,6	8,1

Примечание. 7 — клин (бук или гетинакс); $h_к \approx 5$ *мм*.

27. *Средняя длина полувитка обмотки статора*

$$l_{ср} = l_1 + l_{л1} = 48,5 + 49,4 = 97,9 \text{ см}.$$

28. *Длина вылета лобовой части* по (4-25) и (4-26)

$$l_{в1} \approx 0,5\, A \frac{f_c}{t_c} + M + N =$$

$$= 0,5 \cdot 28,9 \cdot \frac{2,12}{3,26} + 4,5 + 8 \approx 21,5 \text{ см};$$

$$l'_{в1} \approx l_{в1} + 4B + 3 = 21,5 +$$

$$+ 4 \cdot 0,92 + 3 \approx 28 \text{ см}.$$

29. *Общая длина проводников фазы обмотки*

$$L_c = 2w_1\, l_{ср} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 288 \cdot 97,9 \cdot 10^{-2} = 563 \text{ м}.$$

30. *Омическое сопротивление фазы обмотки при 75° С*

$$r_{a75} = \frac{1}{46} \cdot \frac{563}{11,40} = 1,075 \text{ ом};$$

в относительных единицах

$$r^*_{a75} = \frac{I_н\, r_{a75}}{U_н} = \frac{57,3 \cdot 1,075}{3\,640} = 0,0169.$$

31. *Вес меди обмотки статора*

$$G_{м1} = \gamma_м\, m L_c\, s_c \cdot 10^{-3} =$$

$$= 8,9 \cdot 3 \cdot 563 \cdot 11,4 \cdot 10^{-3} = 171 \text{ кг}.$$

Вес меди на 1 *ква* $\frac{G_{м1}}{S_н} = \frac{171}{625} =$ =0,274 *кг/ква*.

г) Воздушный зазор

32. *Длина воздушного зазора под серединой полюса* по (14-59) (принимаем x^*_d=1,35; x^*_σ=0,1; k'=1,06)

$$\delta = \frac{0,36\, A\tau}{k'\left(x^*_d - x^*_\sigma\right) B_{\delta 0}} =$$

$$= \frac{0,36 \cdot 432 \cdot 28,7}{1,06\,(1,35 - 0,1)\, 7\,380} = 0,456 \text{ см}.$$

Возьмем δ=0,45 *см*.

д) Полюс и ярмо ротора

Выбираем для полюсов листовую сталь толщиной 1,5 *мм.*

33. *Радиус дуги очертания полюсного наконечника* по (6-14)

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_м - \delta)}{b_p^2}} =$$

$$= \frac{73}{2 + \frac{8 \cdot 73(0,675 - 0,45)}{20,95^2}} = 31,7 \text{ см}$$

($\delta_м = 1,5\delta = 1,5 \cdot 0,45 = 0,675$ *см*; $b_p = \alpha_p \tau = 0,73 \cdot 28,7 = 20,95$ *см*).

34. *Высота полюсного наконечника по оси полюса* при высоте его по краям $h'_p = 0,9$ *см*

$$h_p = h'_p + R_p - \sqrt{R_p^2 - \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} =$$

$$= 0,9 + 31,7 - \sqrt{31,7^2 - \left(\frac{20,95}{2}\right)^2} =$$

$$= 2,6 \text{ см.}$$

35. *Длина сердечника полюса и полюсного наконечника*

$$l_m = l_p = l_1 = 48,5 \text{ см.}$$

36. *Коэффициент рассеяния полюсов* по (14-74)

$$\sigma_н = 1 + k_\sigma \frac{35\,\delta}{\tau^2} = 1 + 0,67 \times$$

$$\times \frac{35 \cdot 0,45}{28,7^2} = 1,128.$$

37. *Поток полюса*

$$\Phi_m = \sigma_н \Phi_н = 1,128 \cdot 6,95 \cdot 10^6 =$$

$$= 7,83 \cdot 10^6 \text{ мкс.}$$

38. *Сечение и ширина полюсного сердечника:*

$$S_m = \frac{\Phi_m}{B_m} = \frac{7,83 \cdot 10^6}{15\,600} = 500 \text{ см}^2;$$

$$b_m = \frac{S_m}{0,97\, l_m} = \frac{500}{0,97 \cdot 48,5} = 10,5 \text{ см.}$$

39. *Высота полюсного сердечника* по (14-76б)

$$h_m = 10,5\,\delta + 8 = 10,5 \cdot 0,45 + 8 = 12,73 \text{ см.}$$

Возьмем $h_m = 13$ *см.*

40. *Ярмо (обод) ротора* выполняем в виде втулки восьмигранной формы, собранной из листов толщиной 4 *мм* и непосредственно напрессованной на вал; в этом случае высота ярма при диаметре вала $d_в \approx 20$ *см*

$$h_{рот} = \frac{D - 2\delta - 2(h_р + h_m) - d_в}{2} =$$

$$= \frac{73 - 2 \cdot 0,45 - 2(2,6 + 13) - 20}{2} = 10,45 \text{ см,}$$

что дает индукцию в ярме ротора (без учета вала) при

$$l_{a2} = l_m + 11,5 = 48,5 + 11,5 = 60 \text{ см}$$

$$B_р = \frac{\Phi_m}{2h_{рот}\, l_{a2}} = \frac{7,83 \cdot 10^6}{2 \cdot 10,45 \cdot 60} = 6\,150 \text{ гс.}$$

е) Расчет характеристики холостого хода

Для статора выбираем сталь марки Э31.

Магнитный поток и индукция в зазоре при холостом ходе и $E_0 = U_н$ (см. пп. 17 и 18):

$$\Phi_0 = 6,42 \cdot 10^6 \text{ мкс}; \quad B_{\delta 0} = 7\,380 \text{ гс.}$$

41. *Коэффициент воздушного зазора* по рис. 6-10 при

$$\frac{b_{ш1}}{b_{z1}} = \frac{1,52}{1,66} = 0,915 \text{ и } \frac{b_{ш1}}{\delta} = \frac{1,52}{0,45} = 3,38$$

$$k_\delta = 1,22.$$

42. *Магнитное напряжение воздушного зазора*

$$F_\delta = 1,6\,\delta k_\delta\, B_\delta = 1,6 \cdot 0,45 \cdot 1,22\, B_\delta =$$

$$= 0,88\, B_\delta;$$

при $E_0 = U_н$

$$F_{\delta 0} = 0,88 \cdot 7\,380 = 6\,500 \text{ а.}$$

43. *Магнитное напряжение зубцов статора.* Индукция в сечении зубца на 1/3 высоты его от наименьшего сечения

$$B_{z\frac{1}{3}} = \frac{B_\delta\, t_1\, l_\delta}{k_c\, l b_{z\frac{1}{3}}} =$$

$$= \frac{3,18 \cdot 44,5}{0,93 \cdot 40,5 \cdot 1,87} B_\delta = 2,01\, B_\delta$$

$$\left[t_{z\frac{1}{3}} = \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3} h_{п1}\right)}{Z_1} = \right.$$

$$= \frac{\pi\left(73 + \frac{2}{3} \cdot 6,8\right)}{72} = 3,39 \text{ см};$$

$$\left. b_{z\frac{1}{3}} = t_{z\frac{1}{3}} - b_{п1} = 3,39 - 1,52 = 1,87 \text{ см} \right];$$

$$F_z = 2h_{п1}\, H_{z\frac{1}{3}} = 2 \cdot 6,8\, H_{z\frac{1}{3}} = 13,6\, H_{z\frac{1}{3}};$$

при $E_0 = U_н$.

$B_{z\frac{1}{3}} = 2,01 \cdot 7\,380 = 14\,800$ *гс*; по табл. II-2

для $B_{z\frac{1}{3}} = 14\,800$ *гс* $H_{z\frac{1}{3}} = 27,1$ *а/см*;

$$F_{z0} = 13,6 \cdot 27,1 = 368 \text{ а.}$$

44. *Магнитное напряжение ярма статора.* Индукция в ярме статора

$$B_c = \frac{\alpha_\delta \tau l_\delta}{2h_c\, lk_c} B_\delta =$$

$$= \frac{0,68\cdot 28,7\cdot 44,5}{2\cdot 6,2\cdot 40,5\cdot 0,93} B_\delta = 1,85\, B_\delta \,.$$

Средняя длина магнитных линий в ярме статора

$$l_c = \frac{\pi (D_a - h_c)}{2p} = \frac{\pi (99 - 6,2)}{8} = 36,4\ см;$$

$$F_c = l_c \zeta H_c = 36,4\, \zeta H_c;$$

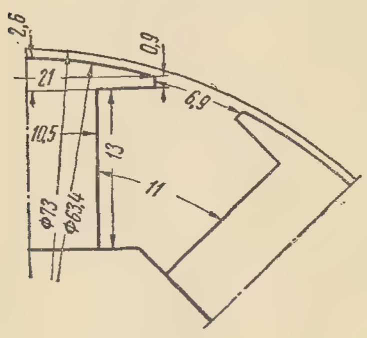


Рис. 14-57.

при $E_0 = U_н$

$$B_c = 18,5\cdot 7\,380 = 13\,650\ гс;\ \text{по рис. 6-17}$$

$$\zeta = 0,35;\ \text{из табл. II-2}\ H_c = 10,7\ а/см;$$

$$F_{c0} = 36,4\cdot 0,35\cdot 10,7 = 136\ а.$$

45. *Магнитное напряжение полюсов.* Через полюс проходит поток $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$. Определим поток Φ_σ. При найденных и указанных на рис. 14-57 размерах проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных наконечников по (6-68)

$$\Lambda_p = \frac{l_p h_{pm}}{0,8 a_p} + 2h_{pm} \lg\left(1 + \frac{\pi}{2}\,\frac{b_p}{a_p}\right) =$$

$$= \frac{48,5\cdot 2,03}{0,8\cdot 6,9} + 2\cdot 2,03 \lg\left(1 + \frac{\pi}{2}\,\frac{21}{6,9}\right) =$$

$$= 20,4$$

$$\left(l_p = l_m = 48,5\ см;\ h_{pm} = \frac{2h_p + h_p'}{3} = \right.$$

$$\left. = \frac{2\cdot 2,6 + 0,9}{3} = 2,03\ см;\ a_p = 6,9\ см\right);$$

эквивалентная проводимость между внутренними и внешними поверхностями полюсных сердечников по (6-70)

$$\Lambda_m = \frac{1}{2}\,\frac{l_m h_m}{0,8 a_m} + h_m \lg\left(1 + \frac{\pi}{2}\,\frac{b_m}{a_m}\right) =$$

$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{48,5\cdot 13}{0,8\cdot 11} + 13 \lg\left(1 + \frac{\pi}{2} \times\right.$$

$$\left.\times \frac{10,5}{11}\right) = 41,5.$$

Поток рассеяния полюсов по (6-67)

$$\Phi_\sigma = 2(\Lambda_p + \Lambda_m)(F_\delta + F_z + F_c) =$$

$$= 2(20,4 + 41,5) F_{\delta zc} = 123,8 F_{\delta zc}.$$

При $E_0 = U_н$

$$\Phi_\sigma = 123,8\,(6500 + 368 + 136) =$$

$$= 0,865\cdot 10^6\ мкс;$$

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = (6,42 + 0,865)\, 10^6 =$$

$$= 7,28\cdot 10^6\ мкс;$$

$$\sigma_0 = \frac{\Phi_m}{\Phi_c} = \frac{7,28\cdot 10^6}{6,42\cdot 10^6} = 1,13.$$

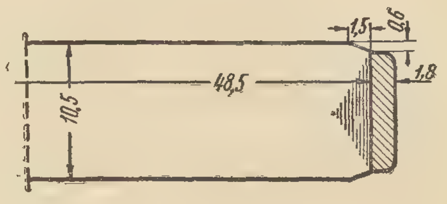


Рис. 14-58.

Сечение полюсного сердечника определяется в соответствии с рис. 14-58:

$$S_m = 0,97\,(10,5\cdot 48,5 - 2\cdot 1,5\cdot 0,6) +$$

$$+ 0,742\cdot 9,3\cdot 1,8 = 520\ см^2.$$

При $E_0 = U_н$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \frac{7,28\cdot 10^6}{520} = 14\,000\ гс;$$

$$F_{m0} = 2(h_m + h_p) H_m = 2(13 + 2,6) H_m =$$

$$= 31,2 H_m = 31,2\cdot 14,9 = 465\ а$$

($H_m = 14,9$ а/см по табл. II-6).

46. *Магнитное напряжение ярма ротора.* Индукция в ярме ротора при $E_0 = U_н$

$$B_p \approx \frac{\Phi_m}{2 l_{a2} h_{рот}'} = \frac{7,28\cdot 10^6}{2\cdot 57\cdot 18} = 3\,500\ гс$$

(высота ярма ротора с учетом вала

$$h_{рот}' \approx 18\ см).$$

Средняя длина линий магнитной индукции $l_{рот} \approx 9$ см. По табл. II-5

$$H_p = 2,8\ а/см;\ F_p = 9\cdot 2,8 = 25,2\ а.$$

Будем считать $F_p = 0$.

47. *Магнитное напряжение зазоров в стыках между полюсами и ярмом.* Примем зазор в стыке $\delta_{ст} = 0,015$ см (см. § 14-5).

При $E_0 = U_н$ имеем:

$$E_{\delta m} = 1,6\delta_{ст} B_m = 1,6\cdot 0,015 B_m =$$

$$= 0,024 B_m = 0,024\cdot 14\,000 = 336\ а.$$

48. *Намагничивающая сила (на пару полюсов) при холостом ходе* и при $E_0 = U_н$

$$F_{в0} = F_{\delta 0} + F_{z0} + F_{c0} + F_{m0} + F_p +$$

$$+ F_{\delta m} = 6\,500 + 368 + 136 + 465 +$$

$$+ 336 = 7\,805\ а.$$

Таблица 14-16

Данные расчета характеристики холостого хода

E_0^* и Φ_0^*, отн. ед.	0,55	1,0	1,1	1,23	1,3
E_0, *в*	2 000	3 640	4 000	4 480	4 730
Φ, *мкс*	$3{,}5\cdot10^6$	$6{,}42\cdot10^6$	$7{,}05\cdot10^6$	$7{,}9\cdot10^6$	$8{,}34\cdot10^6$
B_δ, *гс*	4 060	7 380	8 100	9 070	9 600
$F_\delta = 0{,}88B_\delta$, *а*	3 570	6 500	7 120	7 970	9 600
$B_{z\frac{1}{3}} = 2{,}01B_\delta$, *гс*	8 150	14 800	16 250	18 200	19 250
$H_{z\frac{1}{3}}$, *а/см*	1,37	27,1	69	202	320
$F_z = 13{,}6H_{z\frac{1}{3}}$, *а*	18,6	368	937	2 740	4 350
$B_c = 1{,}85B_\delta$, *гс*	7 500	13 650	15 000	16 750	17 700
H_c, *а/см*	1,19	10,7	31,4	92	153
ζ	0,62	0,35	0,30	0,28	0,26
$F_c = 36{,}4\zeta H_c$, *а*	27	136	342	940	1 450
$F_{\delta zc}$, *а*	3 615	7 000	8 400	11 650	15 400
$\Phi_\sigma = 123{,}8F_{\delta zc}$, *мкс*	$0{,}436\cdot10^6$	$0{,}865\cdot10^6$	$1{,}04\cdot10^6$	$1{,}44\cdot10^6$	$1{,}9\cdot10^6$
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, *мкс*	$3{,}966\cdot10^6$	$7{,}28\cdot10^6$	$8{,}09\cdot10^6$	$9{,}34\cdot10^6$	$10{,}24\cdot10^6$
$B_m = \frac{1}{520}\Phi_m$, *гс*	9 400	14 000	15 500	17 900	19 700
H_m, *а/см*	5,1	14,9	30,5	73	155
$F_m = 31{,}2H_m$, *а*	159	465	950	2 280	4 830
$F_{\delta m} = 0{,}024B_m$, *а*	225	336	372	430	470
$F_m + F_p + F_{\delta m}$, *а*	384	800	1 322	2 710	5 300
$F_в = F_{\delta zc} + F_m + F_p + F_{\delta m}$, *а*	3 999	7 800	9 722	14 360	20 700
$F_в^*$, отн. ед.	0,512	1,0	1,245	1,84	2,65

49. *Характеристика холостого хода.* Расчет магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи выполнялся для нескольких значений E_0 и Φ_0. Результаты расчета сведены в табл. 14-16.

[Расчет F_z при $B_{z\frac{1}{3}} = 19\,250$ *гс* выполнен с учетом ответвления потока в пазы; при этом $H_{z\frac{1}{3}}$ определялась по кривой рис. II-2 для

$$k_{пх} = \frac{b_{п1} l_\delta}{klb_{z\frac{1}{3}}} = \frac{1{,}52\cdot44{,}5}{0{,}93\cdot40{,}5\cdot1{,}87} \approx 1.$$

Магнитные напряжения F_m при $B_m > 16\,000$ *гс* определялись с учетом изменения индукции по высоте полюса (см. § 6-6); при этом H_m рассчитывалась по (6-70а)].

По данным табл. 14-16 на рис. 14-59 построена характеристика холостого хода в относительных единицах; здесь же для сравнения показана пунктиром нормальная характеристика холостого хода (по рис. 14-23).

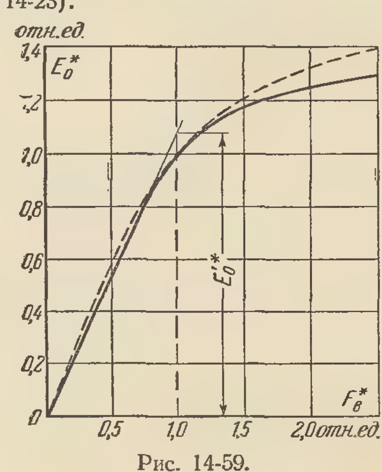


Рис. 14-59.

ж) Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

В соответствии с формулами, приведенными в гл. 7, вначале рассчитаем коэффициенты магнитной проводимости поля рассеяния.

50. *Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния* определяется при размерах паза, указанных на рис. 14-54. по (7-23)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_4}{3b_{п1}} k_\beta + \frac{h_2'}{b_{п1}} k_\beta' + \frac{h_4}{4b_{п1}} =$$

$$= \frac{53,75 - 9}{3.15,2} \cdot 0,873 + \frac{9,8}{15,2} \cdot 0,814 +$$

$$+ \frac{9}{4 \cdot 15,2} = 1,528$$

(по рис. 14-56 в соответствии с рис. 7-6, *а* h_1=53,75 *мм*; h_2'=9,8 *мм*; $b_{п1}$ =15,2 *мм*; h_4=9 *мм*; по рис. 7-8 k_β =0,873; k_β'=0,814).

51. *Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния* по (7-40)

$$\lambda_{д1} = 0,9 \frac{t_1 (q_1 k_{01})^2 \rho_{д1} k_{ш1}}{\delta k_\delta} \sigma_{д1} (0,9) =$$

$$= 0,9 \cdot \frac{3,18 (3 \cdot 0,926)^2 1 \cdot 0,947}{0,45 \cdot 1,22} \times$$

$$\times 0,0111 \cdot 0,9 = 0,36$$

[$\rho_{д1}$=1; по (7-42) $k_{ш1}$=0,947; по табл. 7-2а $\sigma_{д1}$=0,0111; для приближенного учета неравномерности зазора взят коэффициент 0,9].

52. *Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей* по (7-45)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l_\delta'} (l_{л1} - 0,64\beta_1\tau) =$$

$$= 0,34 \cdot \frac{3}{44,5} (49,4 - 0,64 \cdot 0,778 \times$$

$$\times 28,7) = 0,81.$$

53. *Индуктивное сопротивление рассеяния* по (7-57)

$$x_\sigma = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta'}{pq_1} \Sigma\lambda = 0,158 \times$$

$$\times \frac{50}{100} \left(\frac{288}{100}\right)^2 \frac{44,5}{4 \cdot 3} \cdot 2,7 = 6,57 \text{ ом}$$

$$(\Sigma\lambda = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} + \lambda_{к1} =$$

$$= 1,528 + 0,36 + 0,81 = 2,698 \text{ при } \lambda_{к1} = 0).$$

В относительных единицах

$$x_\sigma^* = \frac{I_н}{U_н} x_\sigma = \frac{57,3}{3\,640} \cdot 6,57 = 0,103 \text{ отн. ед.}$$

з) Намагничивающая сила обмотки возбуждения при нагрузке

54. Для определения н. с. $F_{в.н}$ обмотки возбуждения при номинальной нагрузке генератора используем метод, основанный на применении векторной диаграммы Блонделя и частичных магнитных характеристик (§ 6-8, п. 1).

Вначале по данным табл. 14-16 построим частичные магнитные характеристики $\Phi(F_{\delta zc})$, $\Phi_m(F_m + F_p + F_{\delta m})$, $\Phi_\sigma(F)$. Они представлены на рис. 14-60 в относительных единицах, причем за базисные единицы приняты Φ_0, E_0, $F_{в0}$ при $E_0 = U_н$ (в обозначениях величин в относительных единицах звездочка * опущена). Затем построим векторы $\dot{I}_н$, $\dot{U}_н^*$, jx_σ^* (рис. 14-61) и отсюда найдем E_r^*.

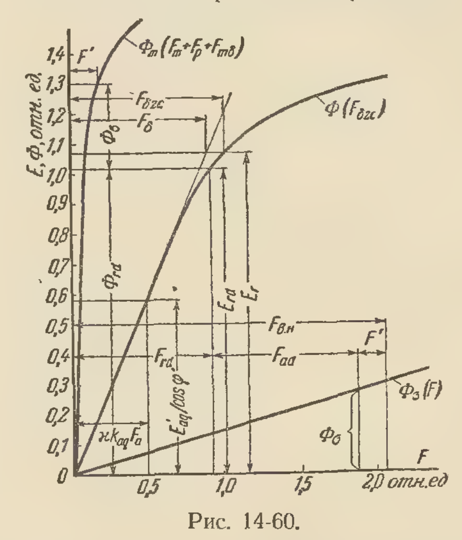


Рис. 14-60.

По характеристике $\Phi(F_{\delta zc})$ и прямой линии, полученной как продолжение прямолинейной части этой характеристики, находим для E_r отношение $F_{\delta zc}/F_\delta$, приближенно определяющее степень насыщения машины: $F_{\delta zc}/F_\delta$ =1,12.

Далее по рис. 6-24 находим $\tilde{\varkappa}_q$=0,83 и по рис. 6-23, *б* для α_p=0,73 и $\frac{\delta}{\tau} = \frac{0,45}{28,7} =$ =0,0157 k_{aq}=0,46; по (6-98)

$$F_a = 2,7 \frac{w_1 k_{01}}{p} I_н = 2,7 \cdot \frac{288 \cdot 0,902}{4} \cdot 57,3 =$$

$$= 10\,050 \text{ а};$$

$$F_a^* = \frac{F_a}{F_{в0}} = \frac{10\,050}{7\,800} = 1,29 \text{ отн. ед.};$$

рассчитываем по (6-107)

$$\frac{F_{aq}'^*}{\cos\psi} = \tilde{\varkappa}_q k_{aq} F_a^* = 0,83 \cdot 0,46 \cdot 1,29 =$$

$$= 0,493 \text{ отн. ед.}$$

По рис. 14-60 находим $E_{aq}'^*/\cos\psi$= =0,58 отн. ед.; откладываем эту величину на продолжении вектора jx_σ^*, как показано на рис. 14-61; отсюда определяем:

$E^*_{rd} = 1,02$ отн. ед.; $\psi = 58,3°$; $\sin\psi = 0,85$; $\cos\psi = 0,526$.

По (6-109)

$$F'^*_{ad} = \tilde{\varkappa}_d k_{ad} F^*_a \sin\psi + \tilde{k}\frac{\tau}{\delta} F^*_a \cos\psi =$$

$$= 0,96\cdot 0,83\cdot 1,29\cdot 0,85 + 0,00165\cdot\frac{28,7}{0,45}\times$$

$$\times 1,29\cdot 0,526 = 0,875 + 0,0715 =$$

$$= 0,946 \text{ отн. ед.}$$

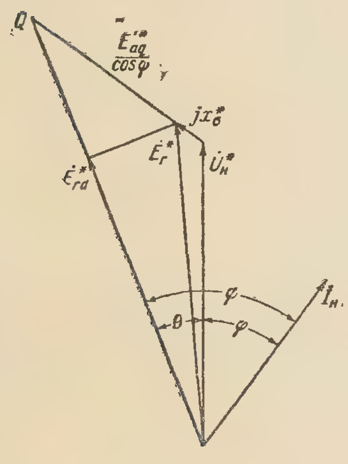


Рис. 14-61.

($\tilde{\varkappa}_d = 0,96$ и $\tilde{k} = 0,00165$ по рис. 6-24; $k_{ad} = 0,83$ по рис. 6-23, *б*).

По кривой $\Phi(F_{\delta zc})$ находим F^*_{rd}, соответствующую E^*_{rd}. Сумма $(F^*_{rd} + F'^*_{ad})$ позволяет определить Φ^*_σ. Поток полюса $\Phi^*_m = \Phi^*_{rd} + \Phi^*_\sigma$; ему соответствует F'^*, равная сумме магнитных напряжений роторных участков магнитной цепи;

$$F^*_{в.н} = F^*_{rd} = F'^*_{ad} + F'^* = 2,06 \text{ отн. ед.}$$

$$F_{в.н} = F^*_{в.н} F_{в0} = 2,06\cdot 7\,800 = 16\,070 \ a.$$

55. *Изменение напряжения.* По рис. 14-59 для $F^*_{в.н} = 2,06$ отн. ед находим $E^*_{0н} = 1,255$ отн. ед.; следовательно, $\Delta U = 0,255$ отн. ед. или $\Delta U\% = 25,5\%$.

и) Обмотка возбуждения и возбудитель.

Выбираем напряжение возбудителя $U_в = 50$ *в*, чему соответствует напряжение на кольцах $U'_к \approx 48$ *в* (§ 14-8). Обмотку возбуждения генератора выполняем как однослойную из голой полосовой меди с изоляцией класса В.

56. *Ширина проводника* по (14-145)

$$b = 5\left[\frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - x\right] =$$

$$= 5\left[\frac{\pi(73 - 2\cdot 0,45 - 2\cdot 2,6 - 2\cdot 13)}{8} - 10,5 - 2\cdot 0,15 - 2,1\right] = 15,75 \ мм$$

(согласно табл. 5-7 толщина изоляции между катушкой и сердечником полюса $\delta_1 = 0,15$ *см*; предварительно $x = 2,1$ *см*); возьмем $b = 15,6$ *мм* (по табл. IV-5).

57. *Длина витка обмотки возбуждения* по (14-151)

$$l_{в.ср} = 2(l_m - 2b') + \pi(b_m + 2\delta_1 + 0,1b) = 2(48,5 - 2\cdot 1,5) + \pi(10,5 + 2\cdot 0,15 + 0,1\cdot 15,6) = 129,8 \ см.$$

58. *Сечение и размеры проводника* по (14-140)

$$s'_в = \frac{1,15\rho_t p F_{в.н} l_{в.ср}\cdot 10^{-2}}{U'_в} =$$

$$= \frac{1,15\cdot 0,0256\cdot 4\cdot 16\,070\cdot 129,8\cdot 10^{-2}}{48} =$$

$$= 51 \ мм^2$$

($\rho_t = \rho_{130} = 0,0256$ *ом · мм²/м*);
по табл. IV-5 выбираем $s_в = 50,7$ *мм²* при $a\times b = 3,28\times 15,6$ *мм·мм*.

59. *Плотность тока* по (14-147)

$$\Delta_в = 20\sqrt{\frac{\Theta_в \alpha k}{b}} =$$

$$= 20\sqrt{\frac{80\cdot 0,016\cdot 0,8}{15,6}} = 5,12 \ а/мм^2$$

(по рис. 14-38 при $v_p \approx 28,7$ *м/сек* $\alpha = 0,016$; при $l_1/\tau = 1,69$ $k = 0,8$; с учетом теплового запаса $\Theta_в = 80°$ С).

60. *Ток возбуждения*

$$I_в = \Delta_в s_в = 5,12\cdot 50,7 = 259 \ а.$$

61. *Число витков на полюс*

$$w_в = \frac{F_{в.н}}{2I_в} = \frac{16\,070}{2\cdot 259} = 31,03;$$

возьмем $w_в = 31$.

62 *Размеры катушки и высота полюсного сердечника* по (14-148)

$$h_{кат} = 0,1(a + \Delta_{пр})(w_в + 1) =$$

$$= 0,1(3,28 + 0,4)(31 + 1) = 11,78 \ см.$$

При опрессовании катушки толщина прокладки между витками $\Delta_{пр}$ уменьшается приблизительно до 0,32 *мм*, при этом $h_{кат} \approx 11,3$ *см*.

По (14-149)

$$h_m = h_{кат} + t_{ш1} + t_{ш2} + \Delta_д =$$

$$= 11,3 + 0,95 + 0,55 + 0,2 = 13 \ см$$

(согласно табл. 5-7 $t_{ш1} = 0,95$ *см* и $t_{ш2} \approx 0,55$ *см*; толщина нижних шайб $t_{ш2}$ устанавливается при изготовлении машины).

63. *Ток возбуждения, плотность тока, превышение температуры:*

$$I_{в.н} = 259 \ а; \ \Delta_в = 5,12 \ а/мм^2; \ \Theta_в = 80° \text{ С}.$$

64. *Общая длина всех витков обмотки возбуждения*

$$L_в = 2pw_в l_{в.ср}\cdot 10^{-2} =$$
$$= 8\cdot 31\cdot 129{,}8\cdot 10^{-2} = 320 \ м.$$

65. *Вес меди обмотки возбуждения*

$$G_{м.в} = \gamma_м L_в s_в \cdot 10^{-3} =$$
$$= 8{,}9\cdot 320\cdot 50{,}7\cdot 10^{-3} = 144{,}5 \ кг.$$

Вес меди на 1 *ква*

$$\frac{G_{м.в}}{S_н} = \frac{144{,}5}{625} = 0{,}231 \ кг/ква.$$

66. *Омическое сопротивление обмотки возбуждения*

$$r_{в120} = \frac{\rho_t L_в}{s_в} = \frac{0{,}025\cdot 320}{50{,}7} = 0{,}158 \ ом$$

(при $80+40=120°$ C $\rho_{120}=0{,}025$);

$$r_{в75} = 0{,}158\cdot\frac{40}{48} = 0{,}1375 \ ом.$$

67. *Максимальный ток возбуждения при* $U'_в = 48$ *в*

$$I_{в.м} = \frac{48}{0{,}158} = 304 \ а.$$

68. *Коэффициент запаса возбуждения*

$$\frac{I_{в.м}}{I_{в.н}} = \frac{304}{259} = 1{,}17.$$

69. *Номинальная мощность возбудителя*

$$P_{в.н} = U_в I_{в.м}\cdot 10^{-3} = 15{,}2 \ квт.$$

к) Параметры и постоянные времени машины

70. *Индуктивные сопротивления взаимной индукции* [по (14-192)]:

по продольной оси

$$x_{ad} = \frac{k_{ad}F_a}{F'_{\delta 0}} = \frac{0{,}83\cdot 10\,050}{6\,760} =$$
$$= 1{,}235 \text{ отн. ед.}$$

[$k_{ad}=0{,}83$; $F_a=10\,050$ *а* (см. п. 54); $F'_{\delta 0} \approx \approx 1{,}04\, F_{\delta 0} = 1{,}04\cdot 6\,500 = 6\,760$ *а*];

по поперечной оси

$$x_{aq} = \frac{k_{aq}F_a}{F_{\delta 0}}\,\frac{1+k_\delta}{2} = \frac{0{,}46\cdot 10\,050}{6\,500}\times$$
$$\times\frac{1+1{,}22}{2} = 0{,}79 \text{ отн. ед.}$$

[$k_{aq}=0{,}46$ (см. п. 54)].

71. *Синхронные индуктивные сопротивления* [(14-194) и (14-195)]:

по продольной оси

$$x_d = x_\sigma + x_{ad} = 0{,}103 + 1{,}235 =$$
$$= 1{,}338 \text{ отн. ед.};$$

по поперечной оси

$$x_q = x_\sigma + x_{aq} = 0{,}103 + 0{,}79 =$$
$$= 0{,}893 \text{ отн. ед.}$$

72. *Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения* по (14-196)

$$x_в = 1{,}27 k_{ad} x_{ad}\left(1 + \frac{2F_{\delta 0}\, l'_m\, \Sigma\lambda}{\Phi_0}\right) =$$
$$= 1{,}27\cdot 0{,}83\cdot 1{,}235\times$$
$$\times\left(1 + \frac{2\cdot 6\,500\cdot 48{,}5\cdot 1{,}095}{6{,}42\cdot 10^6}\right) =$$
$$= 1{,}445 \text{ отн. ед.}$$

[по (14-197)—(14-200) $a_p=5{,}25$ *см*; $d_t=1{,}545$ *см*; $c_p=6{,}47$ *см*; $\lambda_{pl}=0{,}53$; $\lambda_{ml}=0{,}485$; $\lambda_{mв}=0{,}08$; $\Sigma\lambda=1{,}095$].

73. *Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения* по (14-201)

$$x_{t\sigma} = x_в - x_{ad} = 1{,}445 -$$
$$- 1{,}235 = 0{,}21 \text{ отн. ед.}$$

74. *Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси* по (14-216)

$$x'_d = x_\sigma + \frac{x_{ad}\, x_{в\sigma}}{x_{ad} + x_{в\sigma}} =$$
$$= 0{,}103 + \frac{1{,}235\cdot 0{,}21}{1{,}235 + 0{,}21} = 0{,}282 \text{ отн. ед.}$$

75. *Индуктивное сопротивление обратной последовательности* по (14-222)

$$x_2 \approx \sqrt{x_d\, x'} =$$
$$= \sqrt{0{,}282\cdot 0{,}893} \approx 0{,}5 \text{ отн. ед.}$$

76. *Активное сопротивление обмотки возбуждения* по (14-211)

$$r_в = \frac{2\,200\, F_a\, k^2_{ad}\, l_{в.ср}}{\Phi_0\, f w_в\, s_в} =$$
$$= \frac{2\,200\cdot 10\,050\cdot 0{,}83^2\cdot 129{,}8}{6{,}42\cdot 10^6\cdot 50\cdot 31\cdot 50{,}7} = 0{,}00392 \text{ отн. ед.}$$

77. *Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора* по (14-225)

$$T_{d0} = \frac{x_в}{\omega r_в} = \frac{1{,}455}{3{,}14\cdot 0{,}00392} = 1{,}17 \ сек.$$

78. *Постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора* по (14-228)

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d}\,T_{d0} = \frac{0{,}282}{1{,}338}\cdot 1{,}17 = 0{,}246 \ сек.$$

79. *Постоянная времени обмотки статора при замкнутых обмотках ротора* по (14-232)

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r_a} = \frac{0{,}5}{3{,}14\cdot 0{,}0169} = 0{,}094 \ сек.$$

л) Токи короткого замыкания

80. *Кратность тока короткого замыкания при возбуждении холостого хода* (ОКЗ) по (14-268) и рис. 14-59

$$I_{к0} = \text{ОКЗ} = \frac{E'^*_0}{x^*_d} = \frac{1{,}08}{1{,}338} = 0{,}808.$$

81. *Кратность тока короткого замыкания при номинальном возбуждении* по (14-270)

$$f_{к.н} = f_{к0}\, I^*_{в.н} = 0{,}808 \cdot 2{,}06 = 1{,}665$$

$$\left(I^*_{в.н} = F^*_{в.н} = 2{,}06 \text{ отн. ед.} \right).$$

82. *Ударный ток короткого замыкания* по (14-274а)

$$i^*_{уд} \approx 1{,}8 \frac{1{,}05}{x''_d} = 1{,}8 \cdot \frac{1{,}05}{0{,}282} = 6{,}7 \text{ отн. ед.}$$

$$\left(x''_d \approx x'_d = 0{,}282 \text{ отн. ед.} \right).$$

м) Статическая перегружаемость по (14-271)

$$S = M^*_м = \frac{f_{к.н}}{\cos\varphi_н} k =$$

$$= \frac{1{,}665}{0{,}8} \cdot 1{,}025 = 2{,}13$$

$$\Big(E'^*_{00} = E'^*_0\; I^*_{в.н} = 1{,}08 \cdot 2{,}06 = 2{,}22 \text{ отн. ед};$$

$$\varepsilon = \frac{x^*_d - x^*_q}{E'^*_{00} x^*_q} = \frac{1{,}338 - 0{,}893}{2{,}22 \cdot 0{,}893} = 0{,}225;$$

$k \approx 1{,}025$ по рис. 14-55 для $\varepsilon = 0{,}225$).

н) Потери и к. п. д.

83. *Потери в стали ярма статора при холостом ходе* и $E_0 = U_н$ по (8-24)

$$P_{с.с} = k_{д.с} p_{с.с} G_с \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1{,}3 \cdot 4 \cdot 520 \cdot 10^{-3} = 2{,}7 \text{ квт}$$

[$k_{д.с} = 1{,}3$ (см. § 8-3, *а*); $p_{с.с} = 4$ *вт/кг* при $B_с = 13\,650$ *гс* по табл. III-1; вес ярма статора

$$G_с = S_с l_с (2p)\, \gamma_с \cdot 10^{-3} =$$

$$= 233 \cdot 36{,}4 \cdot 8 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 520 \text{ кг},$$

где сечение ярма

$$S_с = h_с l k_с = 6{,}2 \cdot 40{,}5 \cdot 0{,}93 = 233 \text{ см}^2;$$

$l_с = 36{,}4$ *см*; $\gamma_с = 7{,}65$ (см. п. 44 и табл. 2-1)].

84. *Потери в стали зубцов статора при холостом ходе* и $E_0 = U_н$ по (8-26)

$$P_{сz} = k_{дz} p_{сz} G_z \cdot 10^{-3} =$$

$$= 1{,}7 \cdot 4{,}33 \cdot 275 \cdot 10^{-3} = 2{,}03 \text{ квт}$$

[$k_{дz} = 1{,}7$ (см. § 8-3, *б*), $p_{сz} = 4{,}33$ *вт/кг* при индукции в среднем сечении зубца $B_{zср} = 14\,200$ *гс* по табл. III-1; вес стали зубцов

$$G_z = Z b_{zср} h_{п1} l k_с \gamma_с \cdot 10^{-3} = 72 \cdot 1{,}955 \times$$

$$\times 6{,}8 \cdot 40{,}5 \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 275 \text{ кг}\Big].$$

85. *Поверхностные потери в полюсных наконечниках при холостом ходе* и $E_0 = U_н$ по (8-29)

$$P_{пов(0)} = 0{,}6 \cdot 2p\alpha_p \tau l p p_{пов(0)} \cdot 10^{-7} =$$

$$= 0{,}6 \cdot 8 \cdot 0{,}73 \cdot 28{,}7 \cdot 48{,}5 \cdot 2\,700 \cdot 10^{-7} =$$

$$= 1{,}32 \text{ квт}$$

[по (8-28)

$$p_{пов(0)} = K_0 \left(\frac{Zn}{10\,000} \right)^{1,5} \left(\frac{B_0 t_1}{1\,000} \right)^2 =$$

$$= 6 \left(\frac{72 \cdot 750}{10\,000} \right)^{1,5} \left(\frac{1\,890 \cdot 3{,}18}{1\,000} \right)^2 =$$

$$= 2\,700 \text{ вт/м}^2;$$

$K_0 \approx 6$ из табл. 8-1;
по (8-27)

$$B_0 = \beta_0 k_\delta B_{\delta 0} = 0{,}21 \cdot 1{,}22 \cdot 7\,380 = 1\,890 \text{ гс};$$

$\beta \approx 0{,}21$ по рис. 8-4 для $\dfrac{b_{ш1}}{\delta} = \dfrac{1{,}52}{0{,}45} = 3{,}38$].

86. *Механические потери* по (8-22)

$$P_{мех} \approx 0{,}8 \cdot 2p \left(\frac{v}{40} \right)^3 \sqrt{\frac{l_1}{19}} =$$

$$= 0{,}8 \cdot 8 \left(\frac{28{,}7}{40} \right)^3 \sqrt{\frac{48{,}5}{19}} = 3{,}75 \text{ квт}.$$

87. *Электрические потери в обмотке статора* (основные) по (8-41)

$$P_{э1} = m I^2_н r_{a75} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3 \cdot 57{,}3^2 \cdot 1{,}075 \cdot 10^{-3} = 10{,}6 \text{ квт}.$$

88. *Добавочные потери при номинальной нагрузке* (см. § 8-7)

$$P_{доб} \approx 0{,}005\, P_н = 0{,}005 \cdot 500 = 2{,}5 \text{ квт}.$$

89. *Потери на возбуждение при номинальной нагрузке* по (8-47)

$$P_в = \frac{I^2_{в.н} r_{в75} + 2\Delta U_щ I_{в.н}}{\eta_в} \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{259^2 \cdot 0{,}1375 + 2 \cdot 259}{0{,}89} \cdot 10^{-3} = 10{,}9 \text{ квт}.$$

90. *Общие потери при номинальной нагрузке*

$$\Sigma P = P_{с.с} + P_{сz} + P_{пов(0)} + P_{мех} +$$

$$+ P_{э1} + P_{доб} + P_в = 2{,}7 + 2{,}03 +$$

$$+ 1{,}32 + 3{,}75 + 10{,}6 + 2{,}5 + 10{,}9 =$$

$$= 33{,}8 \text{ квт}.$$

91. *Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке* по (8-46)

$$\eta_н = 1 - \frac{\Sigma P}{P_н + \Sigma P} = 1 - \frac{33{,}8}{500 + 33{,}8} =$$

$$= 0{,}937.$$

о) Превышения температуры

92. *Перепад температуры в пазовой изоляции обмотки статора*

$$\Theta_и = 21{,}5^\circ\text{ C (см. п.24)}.$$

93. *Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-119)

$$\Theta_\alpha = \frac{q_c}{\alpha(1+0{,}1v)} =$$

$$= \frac{0{,}95}{8{,}0\cdot 10^{-3}\ (1+0{,}1\cdot 28{,}7)} = 31^\circ\ C$$

$$\left[\text{по (11-118) } q_c = \frac{A\Delta_c}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c1}}{\pi D l_1} = \right.$$

$$= \frac{432\cdot 5{,}02}{4\,200} + \frac{2\,700+2\,030}{\pi\cdot 73\cdot 48{,}5} =$$

$$\left. = 0{,}95\ вт/см^2 \right].$$

94. *Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха* по (11-120)

$$\Theta_л = \frac{q_л}{\alpha(1+0{,}07v)} =$$

$$= \frac{0{,}105}{1{,}33\cdot 10^{-3}\ (1+0{,}07\cdot 28{,}7)} = 26{,}4^\circ\ C$$

$$\left[\text{по (11-111) } q_л = \frac{A\Delta_c}{\gamma_\vartheta} \frac{t_1}{\Pi_1} = \right.$$

$$\left. = \frac{432\cdot 5{,}02}{4\,200} \cdot \frac{3{,}18}{15{,}6} = 0{,}105\ вт/см^2 \right].$$

95. *Среднее превышение температуры обмотки статора* по (11-113)

$$\Theta_c = \frac{(\Theta_и+\Theta_\alpha)\, l_1 + (\Theta_и+\Theta_л)\, l_л}{l_{ср}} =$$

$$= \frac{(21{,}5+31)\,48{,}5+(21{,}5+26{,}4)49{,}4}{97{,}9} =$$

$$= 51^\circ\ C.$$

96. *Среднее превышение температуры обмотки возбуждения* (п. 63)

$$\Theta_в = 80^\circ\ C.$$

Б. Расчет трехфазного синхронного двигателя

Проектное задание. $P_н=500$ *квт*; $U_{н.л}=6\,000$ *в*; $\cos\varphi_н=0{,}9$ (при опережающем токе); $f=50$ *гц*; $n_н=750$ *об/мин*.

а) Номинальные величины

Номинальное фазное напряжение при соединении обмотки статора в звезду

$$U_н = \frac{6\,000}{\sqrt{3}} = 3\,470\ в.$$

Номинальная полная мощность

$$S_н = \frac{P}{\eta_н \cos\varphi} = \frac{500}{0{,}932\cdot 0{,}9} = 596\ ква$$

$$(\eta_н = 0{,}932 \text{ по табл. 14-3}).$$

Номинальный фазный ток

$$I_н = \frac{S_н\cdot 10^3}{\sqrt{3}\,U_{н.л}} = \frac{596\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 6\,000} = 57{,}3\ a.$$

б) Размеры и обмоточные данные

Размеры и обмоточные данные двигателя возьмем такие же, как для генератора в предыдущем примере расчета.

Так как ток статорной обмотки двигателя равен тому же току генератора, то тепловая нагрузка обмотки, ее н. с. $F_a = 10\,050$ *a* остаются неизменными.

в) Пусковая обмотка

Выбираем для пусковой обмотки $Q_у = 8$ пазов на полюс. При этом по (14-135) получим:

$$s_у = \frac{0{,}35\cdot 3 q_1\, u_{п1}\, n_{эл}\, s_в}{Q_у} =$$

$$= \frac{0{,}35\cdot 3\cdot 3\cdot 24\cdot 1\cdot 11{,}4}{8} = 107{,}5\ мм^2;$$

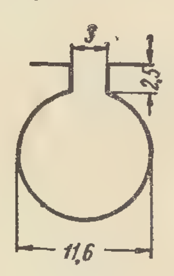


Рис. 14-62.

отсюда диаметр стержня

$$d_с = 1{,}13\sqrt{s_у} = 1{,}13\sqrt{107{,}5} = 11{,}7\ мм;$$

возьмем $d_с = 11{,}5$ *мм*, чему соответствует $s_у = 104$ *мм*^{2}.

Пазовое деление при $z = 0{,}7$ *см* по (14-187)

$$t_2 = \frac{b_p - d_c - 2z}{Q_у - 1} =$$

$$= \frac{21 - 1{,}15 - 2\cdot 0{,}7}{8-1} = 2{,}65\ см.$$

Проверяем условия (14-183) и (14-184):

$$t_2 = 0{,}835\, t_1\ (0{,}8\, t_1 < t_2 < t_1);$$

$$k = 6{,}1\ (k \approx 6).$$

Диаметр круглого паза $d_1 = d_с + 0{,}1 = 11{,}5 + 0{,}1 = 11{,}6$ *мм*.

Высота полюсного наконечника h_p должна быть не меньше

$$2{,}5\, d_1 = 2{,}5\cdot 1{,}16 = 2{,}9\ см.$$

Выбираем следующие размеры паза для пусковой клетки (рис. 14-62):

$$d_1 = 11{,}6\ мм;\quad b_ш = 3\ мм;\quad h_ш = 2{,}5\ мм.$$

Сечение короткозамыкающих сегментов $s_к$

$$(a_к\cdot b_к \approx 0{,}5\, Q_у\, s_у = 0{,}5\cdot 8\cdot 104 = 416\ мм^2)$$

выбираем по табл. IV-7 равным 399,1 *мм*^{2} при размерах

$$a_к = 25\ мм\ (a_к \approx 2d_с = 2\cdot 11{,}5 = 23\ мм);$$

$$b_к = 16\ мм\ (b_к > 0{,}7\, d_с = 0{,}7\cdot 11{,}5 = 8{,}05\ мм).$$

Длину стержня между сегментами возьмем равной $l_c=63$ *см.*

г) Параметры двигателя

Расчет магнитной цепи двигателя производится так же, как для генератора. Намагничивающая сила $F_{в.н}$ при номинальной нагрузке двигателя будет меньше, чем для генератора, так как уменьшаются поток и индукции в участках магнитной цепи и, кроме того, уменьшается F_{ad} вследствие повышения $\cos\varphi_{п}$.

Число витков обмотки возбуждения возьмем равным 30 (вместе 31 для генератора), что позволяет увеличить высоту полюсного наконечника до 3 *см.*

При расчете магнитного напряжения воздушного зазора необходимо учесть увеличение k_δ из-за наличия пазов полюсного наконечника.

Будем считать, что значение $F_{\delta 0}$ для двигателя остается примерно таким же, как для генератора. Поэтому x_{ad} и x_{aq} в относительных единицах при равных номинальных токах ($I_{нд}=I_{нг}$) не изменяются: $x_{ad}=1{,}235$ отн. ед.; $x_{aq}=0{,}79$ отн. ед.

Значение x_σ будет больше:

$$x_\sigma=0{,}103\cdot\frac{3\,640}{3\,470}=0{,}108 \text{ отн. ед.}$$

Следовательно, $x_d=1{,}343$ отн. ед. и $x_q=0{,}898$ отн. ед.

Поток при холостом ходе Φ_0 (п. 17) также изменится

$$\Phi_0=6{,}42\cdot 10^6\cdot\frac{3\,470}{3\,640}=6{,}12\cdot 10^6 \text{ мкс}.$$

Кратность максимального момента $M_м^*$ двигателя снизится по сравнению с $M_м^*$ генератора вследствие уменьшения $F_{в.н}$ и увеличения $\cos\varphi_в$ приблизительно до 1,78.

Параметры роторных цепей, приведенные к обмотке статора и выраженные в относительных единицах, имеют следующие значения:

$$x_в=1{,}445 \text{ отн. ед};\quad x_{в\sigma}=0{,}21 \text{ отн. ед.};$$

$$r_в=0{,}00392 \text{ отн. ед.};$$

по (14-202)

$$x_{у\sigma d}=3{,}9\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1-k_у}\Lambda_{у\sigma d}=$$

$$=3{,}9\frac{10\,050}{6{,}12\cdot 10^6}\cdot\frac{1}{0{,}74}\cdot 12{,}13=0{,}105 \text{ отн. ед.};$$

по (14-203)

$$x_{у\sigma q}=3{,}9\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1+k_у}\Lambda_{у\sigma q}=$$

$$=3{,}9\cdot\frac{10\,050}{6{,}12\cdot 10^6}\cdot\frac{1}{1{,}25}\cdot 12{,}64=$$

$$=0{,}065 \text{ отн. ед.};$$

по (14-213)

$$r_{yd}=\frac{10\,800}{f}\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1-k_у}\left(\frac{c_c l_c}{Q_у s_у}+\frac{c_к\tau C_d}{Q_у s_к}\right)=$$

$$=\frac{10\,800}{50}\cdot\frac{10\,050}{6{,}12\cdot 10^6}\cdot\frac{1}{0{,}74}\left(\frac{1\cdot 63}{8\cdot 104}+\right.$$

$$\left.+\frac{1\cdot 28{,}7\cdot 1{,}4}{8\cdot 399{,}1}\right)=0{,}041 \text{ отн. ед.};$$

по (14-214)

$$r_{yq}=\frac{10\,800}{f}\frac{F_a}{\Phi_0}\frac{1}{1+k_у}\left(\frac{c_c l_c}{Q_у s_у}+\frac{c_к\tau C_q}{Q s_к}\right)=$$

$$=\frac{10\,800}{50}\cdot\frac{10\,050}{6{,}12\cdot 10^6}\cdot\frac{1}{1{,}25}\left(\frac{1{,}63}{8\cdot 104}+\right.$$

$$\left.+\frac{1\cdot 28{,}7\cdot 2{,}1}{8\cdot 399{,}1}\right)=0{,}0262 \text{ отн. ед.}$$

[$F_a=10\,050$ *а*; $\Phi_0=6{,}12\cdot 10^6$ *мкс*; по рис. 14-49 и 14-50 для $Q_у=8$ и $\frac{t_2}{\tau}=\frac{2{,}65}{28{,}7}=0{,}925$ $1-k_у=0{,}74$; $1+k_у=1{,}25$ и $C_d=1{,}4$; $C_q=2{,}1$; по (14-205)

$$\Lambda_{у\sigma d}=\frac{l_p}{Q_у}(\lambda_{п.у}+\lambda_{д.у})+\Lambda_{лd}=$$

$$=\frac{48{,}5}{8}(1{,}49+0{,}357)+0{,}955=12{,}13$$

при

$$\lambda_{п.у}=\left(0{,}785-\frac{b_ш}{2d_1}\right)+\frac{h_ш}{b_ш}=$$

$$=\left(0{,}785-\frac{3}{2\cdot 11{,}6}\right)+\frac{2{,}5}{3}=1{,}49;$$

$$\lambda_{д.у}=\frac{t_2}{g_д\delta}=\frac{2{,}65}{16{,}5\cdot 0{,}45}=0{,}357;$$

$$\Lambda_{лd}=0{,}19\frac{\tau C_d}{Q_у}=0{,}19\cdot\frac{28{,}7\cdot 1{,}4}{8}=0{,}955;$$

по (14-206)

$$\Lambda_{у\sigma q}=\frac{l_p}{Q_у}(\lambda_{п.у}+\lambda_{д.у})+\Lambda_{лq}=$$

$$=\frac{48{,}5}{8}(1{,}49+0{,}357)+1{,}435=12{,}64$$

при $\lambda_{п.у}=1{,}49$; $\lambda_{д.у}=0{,}357$;

$$\Lambda_{лq}=0{,}19\frac{\tau C_q}{Q_у}=$$

$$=0{,}19\cdot\frac{28{,}7\cdot 2{,}1}{8}=1{,}435\Big].$$

д) Пусковые характеристики

Параметры (в относительных единицах), необходимые для расчета пусковых характеристик:

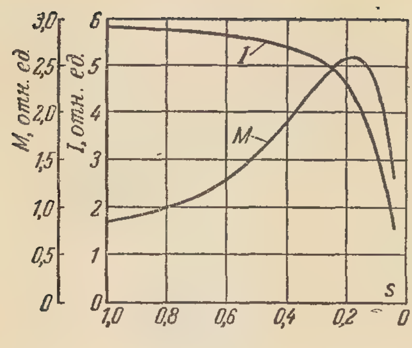


Рис. 14-63.

$x_{ad} = 1,235$; $x_{aq} = 0,79$; $x_{\sigma} = 0,108$;

$$r'_{в} = r_{в}(1 + k) = 0,00392(1 + 15) = 0,0628;$$

$x_{в\sigma} = 0,21$; $r_{yd} = 0,041$; $x_{y\sigma d} = 0,105$;

$r_{yq} = 0,0262$; $x_{y\sigma q} = 0,065$.

Расчеты производим по формулам табл. 14-14.

Результаты расчетов сведены в табл. 14-17.

Пусковые характеристики, построенные по данным табл. 14-17, представлены на рис. 14-63.

Таблица 14-17

Данные расчета пусковых характеристик

s	1,0	0,5	0,25	0,1	0,05
$r_{вs}$	0,0628	0,1256	0,2512	0,628	1,256
r_{yds}	0,041	0,082	0,164	0,41	0,82
r_{yqs}	0,0262	0,0524	0,1048	0,262	0,524
Y_{ad}	$-j0,81$	$-j0,81$	$-j0,81$	$-j0,81$	$-j0,81$
$Y_{вs}$	$1,31-j4,37$	$2,1-j3,5$	$2,34-j1,96$	$1,43-j0,48$	$0,775-j0,129$
Y_{yds}	$3,23-j8,27$	$4,61-j5,92$	$4,33-j2,77$	$2,29-j0,587$	$1,2-j0,1535$
Y'_{ds}	$4,54-j13,45$	$6,71-j10,23$	$6,67-j5,54$	$3,72-j1,877$	$1,975-j1,0925$
Z_{ds}	$0,0226+j0,175$	$0,0447+j0,01764$	$0,089+j0,182$	$0,214+j0,216$	$0,387+j0,322$
Y_{aq}	$-j1,265$	$-j1,265$	$-j1,265$	$-j1,265$	$-j1,265$
Y_{yqs}	$5,35-j13,25$	$7,52-j9,35$	$6,9-j4,28$	$3,6-j0,894$	$1,88-j0,234$
Y'_{qs}	$5,36-j14,515$	$7,52-j10,615$	$6,9-j5,545$	$3,6-j2,159$	$1,88-j1,499$
Z_{qs}	$0,0224+j0,1687$	$0,0443+j0,171$	$0,088+j0,179$	$0,204+j0,230$	$0,325+j0,368$
$\dot{I}'$	$0,75-j5,72$	$1,385-j5,41$	$2,191-j4,465$	$2,235-j2,41$	$1,435-j1,3975$
$\dot{I}''$	$0,023-j0,09$	$0,04-j0,09$	$0,03-j0,04$	$-0,07-j0,08$	$-0,09-j0,12$
I	5,78	5,6	4,98	3,3	2,05
I'_{a}	0,75	1,385	2,191	2,235	1,435
M	0,835	1,53	2,43	2,48	1,59

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ВНЕШНИЕ ДИАМЕТРЫ ЯКОРЕЙ

Таблица I-1

Внешние диаметры якорей машин постоянного тока единой серии П

Номер габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D, мм	83	106	120	138	162	195	210	245	294	327	368

Номер габарита,	12	13	14	15	16	17
D, мм	423	493	590	740	850	990

Номер габарита	18	19	20	21	22	23	24	25	26
D, мм	1 200	1 500	1 800	2 150	2 500	2 850	3 100	3 400	3 800

Номера габаритов и соответствующие им мощности машин серии П:

1—11 — 0,3—200 *квт* (при 1 500 *об/мин*);

12—17 — 200—1 400 *квт* (при 1 000 *об/мин*);

18—22 — 460—5 400 *квт* (при 24—750 *об/мин*);

23—26 — бо́льшие мощности.

Номера габаритов 1—11 относятся к машинам общепромышленного применения.

Таблица I-2

Внешние диаметры пакетов статора асинхронных и синхронных машин единых серий А и С

Номер габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_a, *мм*	133	153	180	208	248	291	343	393	458
Меньшая сторона листа, *мм*	700	800	750	860	750/1000	600	700	800	930
Припуск на штамповку, *мм*	7	7	7	7	7	9	7	7	7

Номер габарита	10	11	12	13	10н	11н	12н	13н	14н	15н
D_a, *мм*	590	740	850	990	520	590	660	740	850	990

Номер габарита	14	15	16	17	18	19	20
D_a, *мм*	1 180	1 430	1 730	2 170	2 600	3 250	4 250

Диаметры D_a габаритов 1—9 применяются для статоров трехфазных асинхронных двигателей новых серий А2 и АО2 на мощности 0,6—100 *квт* (при $2p=4$); под значениями этих диаметров указаны стандартный размер листа (его меньшей стороны) электротехнической стали, из которого штампуются листы статора, и припуск на штамповку. Те же диаметры рекомендуются и для синхронных машин.

Диаметры D_a габаритов 10н—15н намечаются взамен 10—13-го для новых серий асинхронных и синхронных машин на мощности 125—1 000 *квт* (при $2p=4$).

Диаметры D_a габаритов 14—20 применяются при сегментированных статорах для асинхронных и синхронных машин на мощности свыше 1 000 *квт* (при $2p=4$).

Для малых машин на мощности, меньшие 0,6 *квт* (при $2p=4$), рекомендуемые диаметры приведены ниже.

Номер габарита	01	02	03	04	05	06	07
D_a, *мм*	42	50	70	78	89	102	120

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ТАБЛИЦЫ И КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА

Таблица II-1

Листовая электротехническая сталь марок Э11, Э12, Э21 (слабо- и среднелегированная)

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	*B, гс*
4 000	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67	4 000
5 000	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07	5 000
6 000	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56	6 000
7 000	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12	7 000
8 000	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87	8 000
9 000	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91	9 000
10 000	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31	10 000
11 000	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	8,59	7,79	8,00	8,21	11 000
12 000	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0	12 000

Продолжение табл. II-1

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	B, гс
13 000	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3	13 000
14 000	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8	14 000
15 000	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2	15 000
16 000	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66	69,8	73,7	16 000
17 000	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122	17 000
18 000	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188	18 000
19 000	197	206	216	226	235	246	256	268	282	296	19 000
20 000	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595	20 000
21 000	655	725	800	880	960	1 040	1 120	1 200	1 280	1 360	21 000
22 000	1 440	1 520	1 600	1 680	1 760	1 840	1 920	2 000	2 080	2 160	22 000
23 000	2 240	2 320	2 400	2 480	2 560	2 640	2 720	2 800	2 880	2 960	23 000
24 000	3 040	3 120	3 200	3 280	3 360	3 440	3 520	3 600	3 680	3 760	24 000
25 000	3 840	3 920	4 000	4 080	4 160	4 240	4 320	4 400	4 480	4 560	25 000

Примечание. Для индукции свыше 21 500 *гс* кривая намагничивания выражается уравнением $B = 20\,200 + 1{,}256\,H$.

Таблица II-2

Листовая электротехническая сталь марки Э31 (повышеннолегированная)

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	B, гс
2 000	0,44	0,45	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,54	0,55	2 000
3 000	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,63	0,64	0,65	0,66	3 000
4 000	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	4 000
5 000	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89	5 000
6 000	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07	6 000
7 000	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30	7 000
8 000	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1 54	1,58	1,62	8 000
9 000	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,89	1,94	1,99	2,05	2,11	9 000
10 000	2,17	2,23	2,30	2,37	2,41	2,52	2,60	2,69	2,78	2,88	10 000
11 000	2,98	3,09	3,20	3,32	3,45	3,59	3,74	3,90	4,07	4,25	11 000
12 000	4,44	4,65	4,87	5,10	5,35	5,62	5,90	6,20	6,52	6,86	12 000
13 000	7,22	7,60	8,00	8,50	9,00	9,60	10,3	11,1	12,00	13,0	13 000
14 000	14,1	15,3	16,6	18,1	19,7	21,4	23,2	25,1	27,1	29,2	14 000
15 000	31,4	33,7	36,1	38,7	41,4	44,2	47,1	50,1	53,2	56,4	15 000
16 000	59,8	63,3	67,0	70,9	75,0	79,3	83,8	88,5	93,4	98,6	16 000
17 000	101	110	116	123	130	137	145	153	162	171	17 000
18 000	181	191	202	214	227	241	256	272	290	311	18 000
19 000	335	363	397	437	483	537	597	662	732	806	19 000
20 000	883	961	1 040	1 120	1 200	1 280	1 360	1 440	1 510	1 590	20 000
21 000	1570	1 750	1 830	1 910	1 990	2 070	2 150	2 230	2 310	2 390	21 000
22 000	2 460	2 540	2 620	2 700	2 780	2 860	2 940	3 020	3 100	3 180	22 000
23 000	3 260	3 340	3 420	3 500	3 580	3 650	3 730	3 810	3 890	3 970	23 000
24 000	4 050	4 130	4 210	4 290	4 370	4 450	—	—	—	—	—

Таблица II-3

Листовая электротехническая сталь марок Э41, Э42, Э43 (высоколегированная)

B, *гс*	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	*B*, *гс*
4 000	0,96	0,97	0,98	0,99	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	4 000
5 000	1,14	1,17	1,2	1,23	1,26	1,29	1,32	1,36	1,4	1,44	5 000
6 000	1,48	1,52	1,56	1,6	1,64	1,68	1,72	1,77	1,82	1,87	6 000
7 000	1,92	1,97	2,02	2,08	2,14	2,2	2,26	2,33	2,4	2,47	7 000
8 000	2,54	2,61	2,68	2,75	2,82	2,89	2,96	3,03	3,1	3,17	8 000
9 000	3,25	3,33	3,41	3,49	3,58	3,67	3,76	3,85	3,94	4,04	9 000
10 000	4,14	4,24	4,35	4,46	4,58	4,7	4,83	4,96	5,1	5,24	10 000
11 000	5,38	5,53	5,69	5,86	6,04	6,23	6,43	6,64	6,85	7,07	11 000
12 000	7,3	7,54	7,8	8,1	8,4	8,7	9	9,4	9,8	10,3	12 000
13 000	10,8	11,4	12	12,7	13,4	14,1	14,9	15,9	16	17,2	13 000
14 000	19,4	20,6	22	23,4	25	27	29,2	31,4	33,7	36	14 000
15 000	38,5	40,6	42,9	45,2	47,6	50	53	56,5	60	63,5	15 000
16 000	67	71	76	81	86,5	93	100	107	114	122	16 000
17 000	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	17 000
18 000	230	240	250	260	270	280	290	300	312	325	18 000
19 000	340	355	370	385	405	425	450	510	570	630	19 000
20 000	700	770	845	920	1 000	1 080	1 160	1 240	1 380	1 400	20 000
21 000	1 480	1 560	1 640	1 720	1 800	1 880	1 960	2 040	2 120	2 200	21 000
22 000	2 280	2 360	2 440	2 520	2 600	2 680	2 760	2 840	2 920	3 000	22 000

Примечание. Для индукций свыше 20 600 *гс* кривая намагничивания выражается уравнением $B = 19\,140 + 1{,}256\,H$.

Таблица II-4

Листовая электротехническая сталь (холоднокатаная) марки Э330

B, *гс*	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	*B*, *гс*
6 000	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,99	6 000
7 000	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	7 000
8 000	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4	1,42	1,44	1,46	1,49	8 000
9 000	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,76	1,79	9 000
10 000	1,82	1,85	1,88	1,92	1,95	1,98	2,01	2,04	2,07	2,1	10 000
11 000	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2,34	2,37	2,4	11 000
12 000	2,43	2,46	2,49	2,52	2,55	2,58	2,61	2,64	2,67	2,71	12 000
13 000	2,75	2,79	2,83	2,87	2,91	2,95	3,0	3,05	3,10	3,15	13 000
14 000	3,2	3,26	3,32	3,38	3,44	3,5	3,58	3,66	3,74	3,82	14 000
15 000	3,9	4,02	4,14	4,26	4,38	4,5	4,64	4,78	4,92	5,06	15 000
16 000	5,2	5,44	5,66	5,88	6,1	6,32	6,65	6,98	7,32	7,66	16 000
17 000	8,0	8,4	8,9	9,4	9,9	10,4	11,32	12,24	13,16	14,08	17 000
18 000	15,0	15,42	17,0	19,22	21,44	23,66	25,88	28,2	30,8	34,5	18 000
19 000	38,25	42	46	52	58	70	82	94	109	134	19 000
20 000	160	200	250	300	—	—	—	—	—	—	—

Таблица II-5

Литая сталь, толстые листы (Ст.3), поковки

B, *гс*	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72
1 000	0,8	0,88	0,96	1,04	1,12	1,2	1,28	1,36	1,44	1,52
2 000	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
3 000	2,4	2,48	2,5	2,64	2,72	2,8	2,88	2,96	3,04	3,12

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
4 000	3,2	3,28	3,36	3,44	3,52	3,6	3,68	3,76	3,84	3,92
5 000	4,0	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,7	4,79
6 000	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
7 000	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
8 000	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
9 000	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,5	8,73	8,85	8,98	9,11
10 000	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,73
11 000	10,9	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
12 000	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
13 000	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
14 000	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
15 000	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
16 000	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

Таблица II-6

Листовая сталь толщиной 1—2 *мм* (для полюсов)

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1 000	1									
2 000	1,4									
3 000	1,8									
4 000	2,1									
5 000	2,5					2,75				
6 000	2,95					3,2				
7 000	3,45					3,75				
8 000	4,05					4,4				
9 000	4,8	4,9	4,95	5,05	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
10 000	5,7	5,82	5,95	6,07	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
11 000	6,9	7,03	7,2	7,31	7,48	7,6	7,75	7,9	8,08	8,25
12 000	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,15	10,45
13 000	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13,0	13,5	13,93	14,5
14 000	14,9	15,3	15,95	16,45	17,0	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
15 000	22,7	24,5	25,6	27,1	28,8	30,5	32,0	34,0	36,5	37,5
16 000	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,8	59,5	62,3	66,0
17 000	70,5	75,3	79,5	84,0	88,5	93,2	98,0	103,0	108,0	114,0
18 000	119,0	124,0	130,0	135,0	141,0	148,0	156,0	162,0	170,0	178,0
19 000	188,0	197,0	207,0	215,0	226,0	235,0	245,0	256,0	265,0	275,0
20 000	290,0	302,0	315,0	328,0	342,0	361,0	380,0			

Таблица II-7

Чугун

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	0	1	2	2,8	3,6	4,2	4,6	5	5,4	6,7
1 000	6	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7
2 000	9	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,8
3 000	12,2	12,6	13	13,4	13,8	14,3	14,7	15,1	15,6	16
4 000	16,4	16,9	17,5	18	18,6	19,1	19,7	20,2	20,8	21,4
5 000	22	22,6	23,5	24	24,7	25,5	26,2	27	27,8	28,6
6 000	29,4	30,3	31,3	32,2	33,2	34,2	35,2	36,2	37,2	38,2
7 000	39,2	40,5	41,8	43,2	44,6	46	47,5	49,1	50,7	52,3
8 000	54	55,7	57,5	59,3	61,1	63	65	67,1	69,3	71,4
9 000	73,6	75	77,8	80	83	86	89	92	95	98
10 000	101	105	108	112	116	120	124	128	132	136
11 000	140	144	149	154	159	165	170	175	181	186

В, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
12 000	192	198	204	211	218	225	232	240	247	255
13 000	262	270	278	286	294	303	312	321	330	339
14 000	348	359	370	382	392	409	423	436	450	464
15 000	478	494	570	520	545	562	580	600	—	—

Таблица II-8

Роторные поковки для турбогенераторов до 25 *Мвт* (включительно)

В, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1 000	0,75	0,83	0,9	0,98	1,05	1,13	1,28	1,28	1,35	1,43
2 000	1,5	1,58	1,65	1,73	1,8	1,88	1,95	2,0	2,1	2,18
3 000	2,25	2,33	2,4	2,48	2,55	2,63	2,7	2,78	2,85	2,93
4 000	3,0	3,08	3,15	3,23	3,3	3,38	3,45	3,53	3,6	3,68
5 000	3,75	3,83	3,85	3,93	4,0	4,08	4,15	4,23	4,3	4,38
6 000	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
7 000	5,5	5,65	5,8	5,95	6,1	6,25	6,40	6,55	6,7	6,85
8 000	7,0	7,15	7,30	7,45	7,6	7,75	7,9	8,05	8,2	8,35
9 000	8,5	8,65	8,8	8,95	9,1	9,25	9,4	9,55	9,7	9,85
10 000	10,0	10,21	10,4	10,6	10,8	11,0	11,2	11,4	11,6	11,8
11 000	12,0	12,4	12,8	13,2	13,6	14,0	14,4	14,8	15,2	15,7
12 000	16,2	16,5	17,2	17,7	18,2	18,8	19,4	20	20,6	21,2
13 000	21,8	22,4	23	23,7	24,5	25,2	26,0	26,8	27,7	28,6
14 000	29,5	30,5	31,5	32,6	33,7	34,8	36	37,2	38,3	39,7
15 000	41,0	42,5	44	45,5	47	48,5	50,3	52,2	54,3	57
16 000	59,5	62,2	65	68	71	74	77	81	85	89,2
17 000	93,5	97,5	103	107	113	119	125	131	137	144
18 000	151	160	170	180	190	200	212	223	234	245
19 000	256	268	280	292	305	320	340	360	385	410
20 000	435	460	495	525	570	620	675	740	810	880
21 000	950	1 030	1 110	1 190	1 270	1 350	1 430	1 510	1 590	1 670
22 000	1 750	1 830	1 910	1 990	2 070	2 150	2 230	2 310	2 390	2 470
23 000	2 550	2 630	2 710	2 790	2 870	2 950	3 030	3 110	3 190	3 270
24 000	3 350	3 430	3 510	3 590	3 670	3 750	3 830	3 910	3 990	4 070
25 000	4 150	4 230	4310	4 390	4 470	4 550	4 630	4 710	4 790	4 870

Таблица II-9

Роторные поковки для турбогенераторов мощностью свыше 25 *Мвт*

B, гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1 000	5,4	5,49	5,58	5,67	5,76	5,85	5,94	6,03	6,12	6,21
2 000	6,3	6,39	6,48	7,47	7,56	7,65	7,74	7,83	8,92	8,01
3 000	7,2	7,29	7,38	7,57	7,66	7,75	7,84	7,93	7,02	8,11
4 000	8,1	8,19	8,28	8,37	8,46	8,55	8,64	8,73	8,82	8,91
5 000	9,0	9,09	9,18	9,27	9,36	9,45	9,54	9,63	9,72	9,81
6 000	9,9	9,99	10,08	10,17	10,26	10,35	10,44	10,53	10,62	10,71
7 000	10,8	10,89	10,98	11,07	11,16	11,25	11,34	11,43	11,52	11,61
8 000	11,7	11,79	11,83	11,97	12,06	12,15	12,24	12,33	12,42	12,51
9 000	12,6	12,69	12,78	12,87	12,96	13,05	13,14	13,23	13,32	13,41
10 000	13,5	13,59	13,68	13,77	13,86	13,95	14,04	14,13	14,22	14,31
11 000	14,4	14,49	14,58	14,67	14,76	14,85	14,94	15,03	15,12	15,21
12 000	15,3	15,48	15,66	15,84	16,02	16,2	16,44	16,68	16,92	17,16
13 000	17,4	17,96	18,52	19,08	19,64	20,2	20,76	21,3	21,88	22,44
14 000	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0	31,3	32,6
15 000	34	35,4	36,8	38,2	39,6	41	42,8	44,6	46,4	48,2
16 000	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77
17 000	80	83	86	90	94	99	104	109	114	120
18 000	128	135	142	150	160	170	180	200	220	240
19 000	260	305	350	395	463	5 300	600	727	854	980
20 000	1 060	1 140	1 220	1 300	1 380	1 460	1 540	1 620	1 700	1 780
21 000	1 860	1 940	2 020	2 100	2 180	2 260	2 340	2 420	2 500	2 580
22 000	2 660	2 740	2 820	2 900	2 980	3 060	3 140	3 220	3 300	3 380
23 000	3 460	3 540	3 620	3 700	3 780	3 860	3 940	4 020	4 100	4 180
24 000	4 260	4 340	4 420	4 500	4 580	4 660	4 740	4 820	4 900	4 980
25 000	5 060	5 140	5 220	5 300	5 380	5 460	5 540	5 620	5 700	5 780

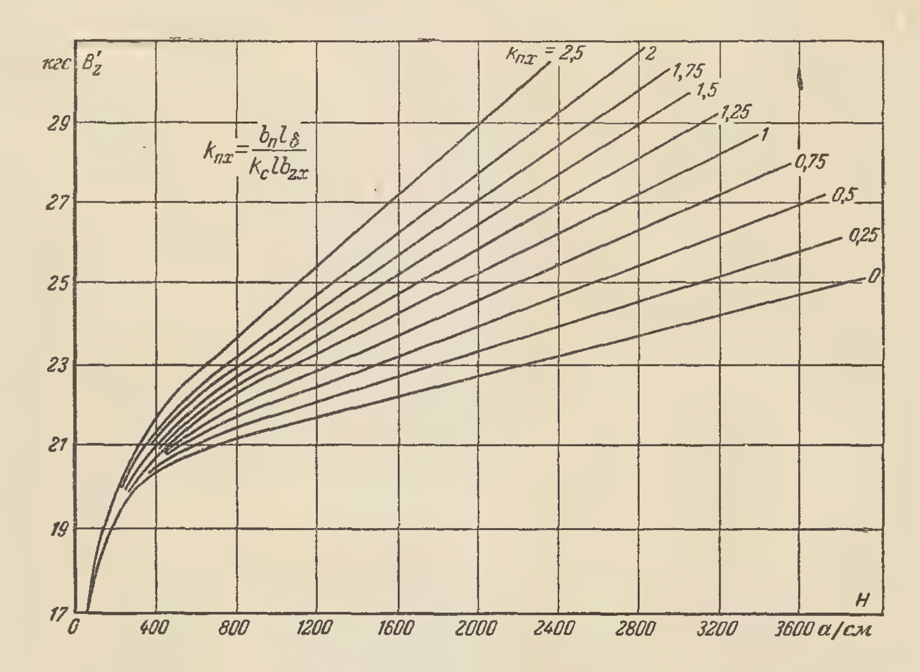


Рис. II-1. Кривые намагничивания сталей Э11, Э12, Э21 (к определению магнитного напряжения зубцов).

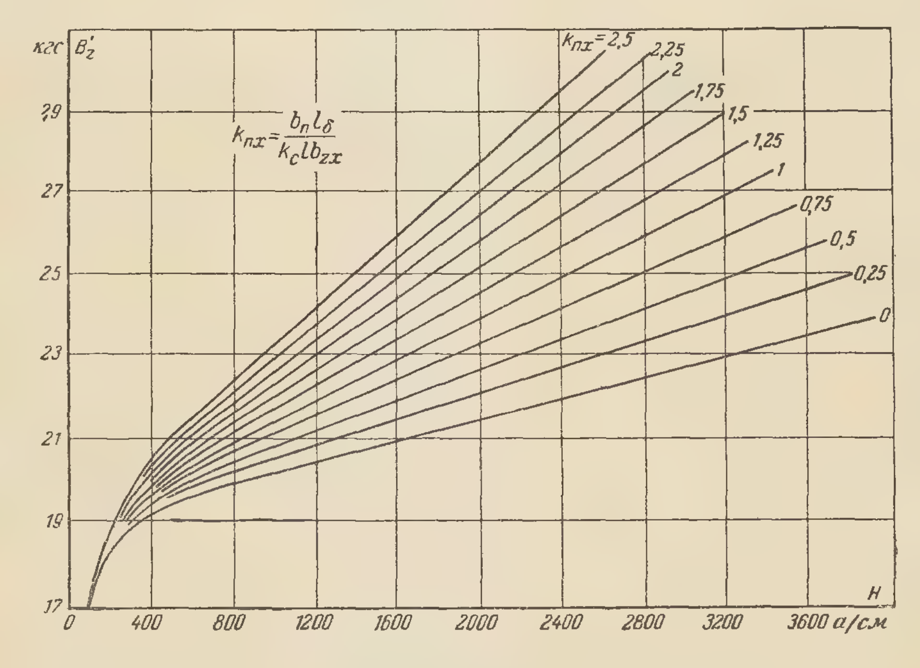


Рис. II-2. Кривые намагничивания стали Э31 (к определению магнитного напряжения зубцов).

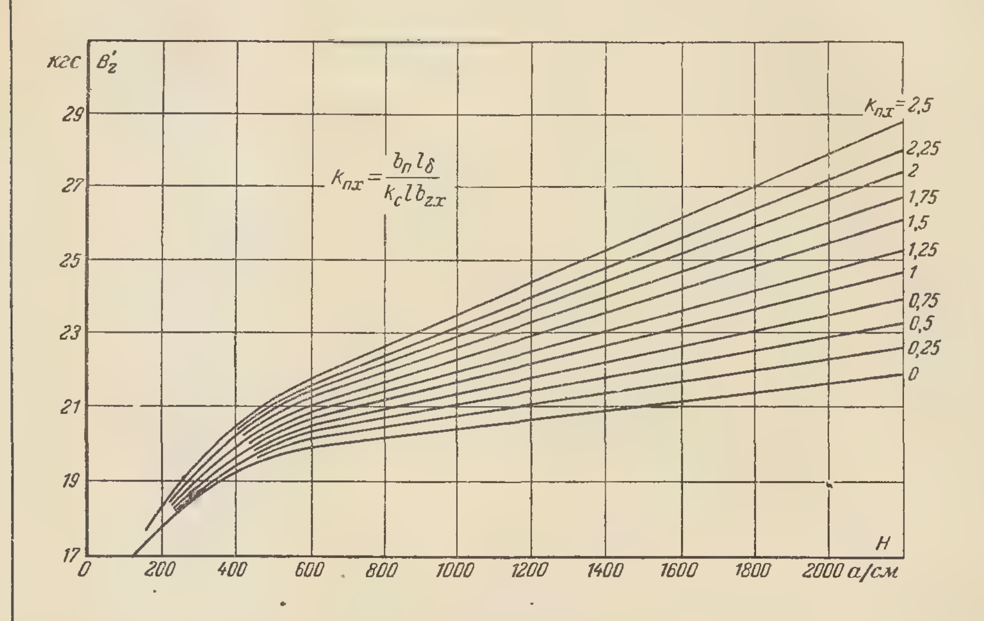


Рис. II-3. Кривые намагничивания сталей Э41, Э42 и Э43 (к определению магнитного напряжения зубцов).

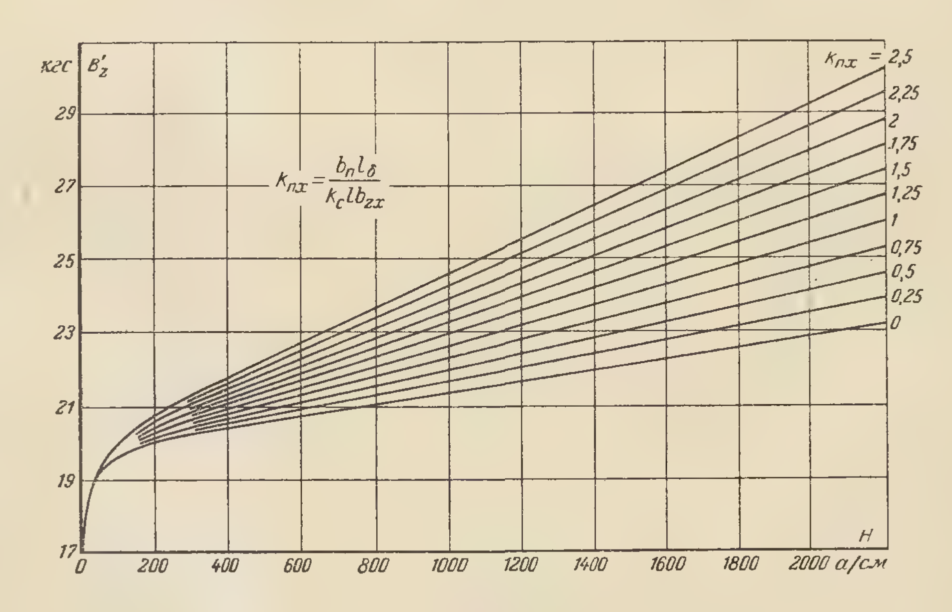


Рис. II-4. Кривые намагничивания стали Э330 (к определению магнитного напряжения зубцов).

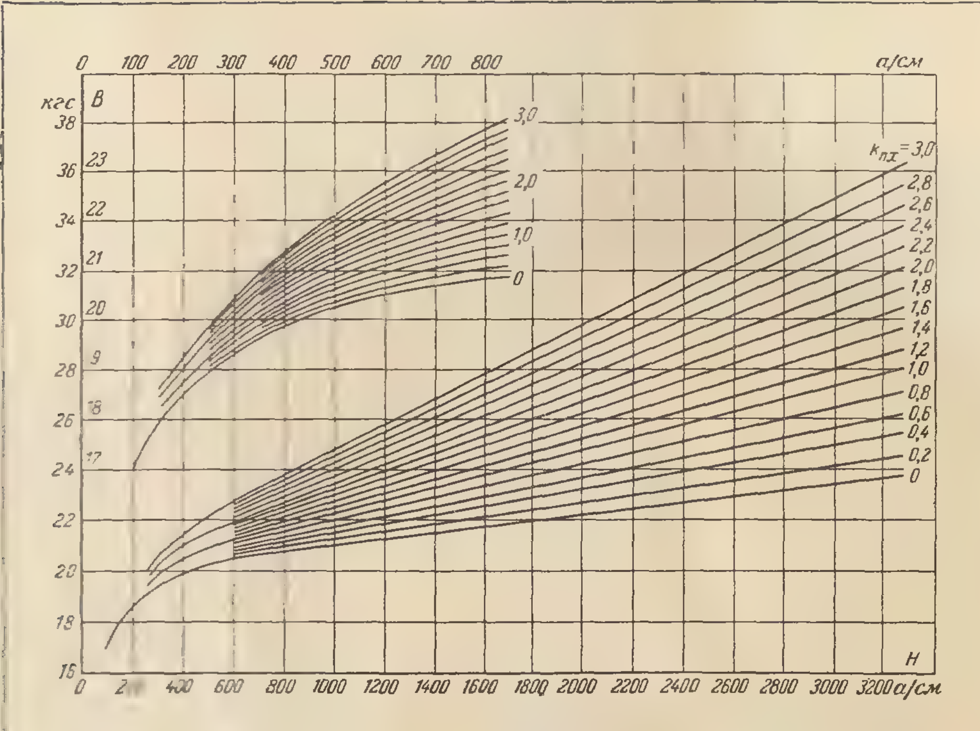


Рис II-5. Кривые намагничивания роторных поковок для турбогенераторов мощностью до 25 *Мвт* включительно (к определению магнитного напряжения зубцов ротора).

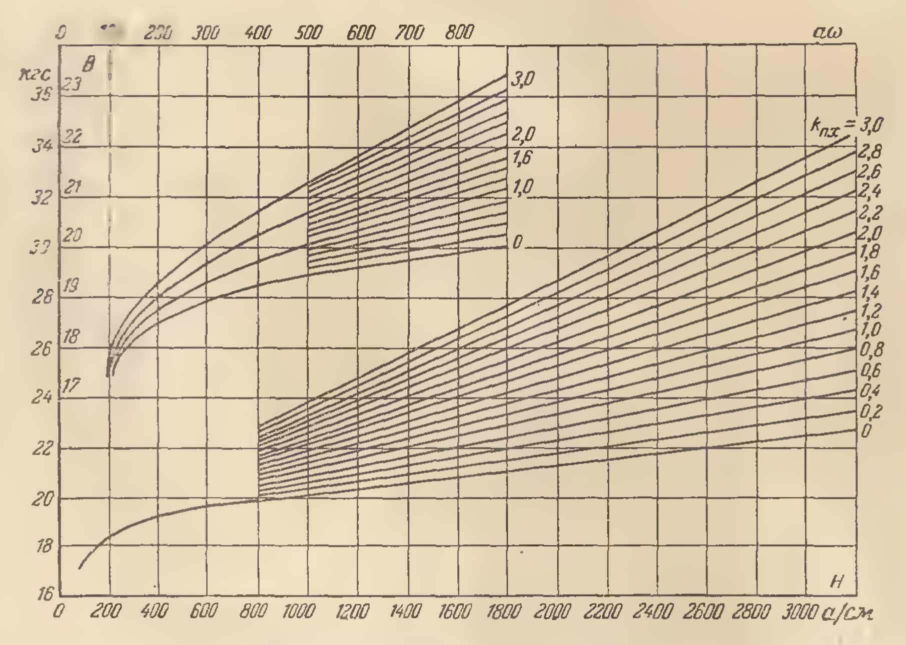


Рис. II-6. Кривые намагничивания роторных поковок для турбогенераторов мощностью свыше 25 *Мвт* (к определению магнитного напряжения зубцов ротора).

УДЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Таблица III-1

Удельные потери, *вт/кг*, листовой электротехнической стали марки Э11 толщиной 0,5 *мм* при частоте 50 *гц*

B, *гс*	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
5 000	1	1,04	1,08	1,11	1,14	1,2	1,2	1,25	1,31	1,35
6 000	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85
7 000	1,9	1,95	2	2,05	2,1	2,15	2,15	2,15	2,2	2,25
8 000	2,3	2,35	2,4	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75
9 000	2,8	2,85	2,9	2,95	3,0	3,05	3,1	3,15	3,2	3,25
10 000	3,3	3,36	3,42	3,48	3,55	3,62	3,7	3,78	3,86	3,94
11 000	4,02	4,1	4,18	4,26	4,34	4,42	4,5	4,6	4,7	4,8
12 000	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
13 000	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8
14 000	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8
15 000	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8
16 000	9,0	9,1	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8
17 000	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4	10,52	10,6	10,76	10,88
18 000	11,0	11,15	11,3	11,45	11,6	11,75	11,9	12,15	12,2	12,35
19 000	12.5	12,65	12,8	12.95	13,1	13,25	13,4	13,55	13,7	13,9

Примечание. Для других марок электротехнической стали значения в таблице нужно умножить на коэффициент χ.

Марка стали	Э12 0,5	Э21 0,5	Э31 0,5	Э31 0,35	Э41 0,5	Э42 0,5	Э41 0,35	Э42 0,35	Э310 0,5	Э320 0,5	Э330 0,5	Э310 0,35	Э320 0,35	Э330 0,35
Коэффициент χ	0,97	0,76	0,61	0,49	0,47	0,43	0,41	0,36	0,33	0,28	0,24	0,24	0,21	0,18

Примечание. Для частот тока f, отличающихся от 50 *гц* (в пределах 10—100 *гц*), потери можно определить по формуле

$$p_f = p_{f=50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Таблица IV-1

ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Номинальные диаметры *d*, сечения *s*, веса *G* и сопротивления 1 *км* меди обмоточной круглой

Диаметр *d*, *мм*	Сечение *s*, *мм*	Вес 1 *км* *G*, *кг*	Сопротивление 1 *км* при 15° С, *ом*	Диаметр *d*, *мм*	Сечение *s*, *мм*²	Вес 1 *км* *G*, *кг*	Сопротивление 1 *км* при 15° С, *ом*
0,05	0,00196	0,01746	9 100	(0,77)	0,466	4,14	36,9
0,06	0,00283	0,0252	6 310	0,80	0,503	4,47	34,2
0,07	0,00385	0,0342	4 630	(0,83)	0,541	4,81	31,8
0,08	0,00503	0,0447	3 550	0,86	0,581	5,16	29,6
0,09	0,00636	0,0566	2 810	(0,90)	0,636	5,66	27,0
0,10	0,00785	0,0698	2 270	0,93	0,679	6,04	25,3
0,11	0,00950	0,0845	1 813	(0,96)	0.724	6,43	23,8
0,12	0,01131	0,1005	1 524	1,00	0,785	6,98	21,9

Продолжение табл. IV-1

Диаметр d, мм	Сечение s, мм²	Вес 1 км G, кг	Сопротивление 1 км при 15° С, ом	Диаметр d, мм	Сечение s, мм²	Вес 1 км G, кг	Сопротивление 1 км при 15° С, ом
0,13	0,01327	0,1180	1 296	(1,04)	0,849	7,55	20,3
0,14	0,01539	0,1368	1 118	1,08	0,916	8,14	18,79
0,15	0,01767	0,1571	974	(1,12)	0,985	8,75	17,47
0,16	0,0201	0,1788	856	1,16	1,057	9,40	16,28
0,17	0,0227	0,202	758	(1,20)	1,131	10,05	15,22
0,18	0,0255	0,226	674	1,25	1,227	10,91	14,02
0,19	0,0284	0,252	606	(1,30)	1,327	11,80	12,96
0,20	0,0314	0,279	548	1,35	1,431	12,73	12,01
0,21	0,0346	0,308	497	(1,40)	1,539	13,69	11,18
0,23	0,0415	0,369	415	1,45	1,651	14,68	10,41
0,25	0,0491	0,436	351	(1,50)	1,767	15,71	9,74
0,27	0,0573	0,509	300	1,56	1,911	16,99	9,00
0,29	0,0661	0,587	260	(1,62)	2,06	18,32	8,36
0,31	0,0755	0,671	228	1,68	2,22	19,71	7,75
0,33	0,0855	0,760	201	(1,74)	2,38	21,1	7,23
0,35	0,0962	0,855	178,8	1,81	2,57	22,9	6,70
0,38	0,1134	1,008	151,8	(1,88)	2,78	24,7	6,19
0,41	0,1320	1,173	130,3	1,95	2,99	26,5	5,76
0,44	0,1521	1,352	113,2	(2,02)	3,20	28,5	5,38
0,47	0,1735	1,542	99,2	2,10	3,46	30,8	4,97
(0,49)	0,1886	1,676	91,3	2,26	4,01	35,7	4,29
0,51	0,204	1,816	84,4	2,44	4,68	41,6	3,68
(0,53)	0,221	1,961	77,8	2,63	5,43	48,3	3,17
0,55	0,238	2,11	72,3	2,83	6,29	55,9	2,73
(0,57)	0,255	2,27	67,5	3,05	7,31	65,0	2,35
0,59	0,273	2,43	63,0	3,28	8,45	75,1	2,04
(0,62)	0,302	2,68	57,0	3,53	9,79	87,0	1,758
0,64	0,322	2,86	53,4	3,80	11,34	100,8	1,518
(0,67)	0,353	3,13	48,7	4,10	13,20	117,4	1,303
0,69	0,374	3,32	46,0	4,50	15,90	141,4	1,082
(0,72)	0,407	3,62	42,3	4,80	18,10	160,9	0,951
0,74	0,430	3,82	40,0	5,20	21,2	188,8	0,812

Примечания: 1. До диаметра 0,1 *мм* включительно проводники изготовляются из твердотянутой меди с повышенным удельным сопротивлением. 2. Диаметры проводников в скобках являются малоупотребительными; в частности, для марки ПЭЛ применять их не рекомендуется.

Таблица IV-3

Максимальные диаметры эмалированных проводов

Номинальный диаметр голого провода, *мм*	Максимальный диаметр эмалированного провода, *мм*		Номинальный диаметр голого провода, *мм*	Максимальный диаметр эмалированного провода, *мм*	
	ПЭЛ ПЭВ1 ПЭМ1 ПЭВА	ПЭВ2 ПЭМ2 ПЭВПИ ПЭВА2 ПЭТВ		ПЭЛ ПЭВ1 ПЭМ1 ПЭВА	ПЭВ2 ПЭМ2 ПЭВПИ ПЭВА2 ПЭТВ
0,05	0,065	—	0,64	0,690	0,72
0,06	0,075	0,09	0,67	0,720	0,75
0,07	0,085	0,10	0,69	0,740	0,77
0,08	0,095	0,11	0,72	0,780	0,80
0,09	0,105	0,12	0,74	0,800	0,83
0,10	0,120	0,13	0,77	0,830	0,86
0,11	0,130	0,14	0,80	0,860	0,89
0,12	0,140	0,15	0,83	0,890	0,92
0,13	0,150	0,16	0,86	0,920	0,95
0,14	0,160	0,17	0,90	0,960	0,99
0,15	0,170	0,19	0,93	0,990	1,02
0,16	0,180	0,20	0,96	1,020	1,05
0,17	0,190	0,21	1,00	1,070	1,11
0,18	0,200	0,22	1,04	1,120	1,15
0,19	0,210	0,23	1,08	1,160	1,19
0,20	0,225	0,24	1,12	1,200	1,23
0,21	0,235	0,25	1,16	1,240	1,27
0,23	0,255	0,28	1,20	1,280	1,31
0,25	0,275	0,30	1,25	1,330	1,36
0,27	0,310	0,32	1,30	1,380	1,41
0,29	0,330	0,34	1,35	1,430	1,46
0,31	0,350	0,36	1,40	1,480	1,51
0,33	0,370	0,38	1,45	1,530	1,56
0,35	0,390	0,41	1,50	1,580	1,61
0,38	0,420	0,44	1,56	1,640	1,67
0,41	0,450	0,47	1,62	1,710	1,73
0,44	0,490	0,50	1,68	1,770	1,79
0,47	0,520	0,53	1,74	1,830	1,85
0,49	0,540	0,55	1,81	1,900	1,93
0,51	0,560	0,58	1,88	1,970	2,00
0,53	0,580	0,60	1,95	2,040	2,07
0,55	0,600	0,62	2,02	2,120	2,14
0,57	0,620	0,64	2,10	2,200	2,24
0,59	0,640	0,66	2,26	2,360	2,39
0,62	0,670	0,69	2,44	2,540	2,57

Номинальные размеры (*мм*) и расчетные сечения (*мм*²) меди

Большая сторона сечения *b*, *мм*	Расчетные площади поперечного сечения *s*, *мм*²,													
	0,9	1,01	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44
2,10	1,72	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	3,07	3,32	3,59	—	3,92	—	—
2,26	1,86	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	3,83	—	—	4,63	—
2,44	2,03	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,21	4,55	4,64	4,95	5,37
2,63	2,20	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	3,80	4,21	4,55	4,92	5,04	5,46	5,94
2,83	2,38	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	4,91	5,31	5,46	5,92	6,43
3,05	—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,41	6,96
3,28	—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52
3,53	—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	6,18	6,67	6,93	7,50	8,13
3,80	3,25	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79
4,10	—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52
4,40	—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,20
4,70	—	4,49	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,10	11,00
5,10	—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	7,75	8,36	9,02	9,74	10,20	11,00	11,90
5,50	—	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,50	11,10	11,90	12,90
5,90	—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	10,50	11,30	11,90	12,80	13,90
6,40	—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	9,77	10,60	11,40	12,30	12,90	14,00	15,10
6,90	—	6,69	7,24	7,79	8,24	9,11	9,79	10,60	11,40	12,30	13,30	14,00	15,10	16,30
7,40	—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,50	11,30	12,60	13,30	14,20	15,00	16,20	17,60
8,00	—	7,79	8,43	9,07	9,79	10,60	11,40	12,30	13,20	14,40	15,40	16,30	17,60	19,00
8,60	—	8,39	9,08	9,77	10,60	11,40	12,30	13,20	14,20	15,50	16,60	17,60	18,90	20,50
9,30	—	—	—	—	—	12,40	13,30	14,30	15,40	16,60	17,90	19,00	20,50	22,20
10,00	—	—	—	11,40	—	—	—	15,40	16,60	17,90	19,30	20,50	22,10	23,90
10,80	—	—	—	—	—	—	—	—	17,90	19,30	20,90	22,20	23,90	25,90
11,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23,90	25,70	27,80
12,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,80	27,80	30,00
13,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32,40
14,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34,90
15,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Расчетные площади поперечных сечений даны с учетом закругления углов.
2. Тонкой сплошной линией снизу ограничена область поставки проводов ПСД и ПСДК. В жирной рамке указаны АПБД.

Таблица IV-2

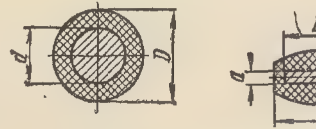
обмоточной прямоугольной

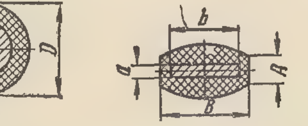
при меньшей стороне сечения *a*, *мм*														Большая сторона сечения *b*, *мм*
2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70	5,10	5,50	6,00	6,50	7,00	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,10
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,26
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,44
6,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,63
6,98	7,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,83
7,54	8,15	8,72	9,51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,05
8,15	8,80	9,51	10,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,28
8,80	9,51	10,30	11,10	12,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,53
9,51	10,30	11,10	12,00	12,90	13,90	—	—	—	—	—	—	—	—	3,80
10,30	11,10	12,00	13,00	14,00	15,10	15,90	—	—	—	—	—	—	—	4,10
11,10	12,00	12,90	13,90	15,00	16,20	17,10	18,50	—	—	—	—	—	—	4,40
11,90	12,80	13,80	14,90	16,10	17,40	18,40	19,70	21,1	—	—	—	—	—	4,70
12,90	13,90	15,10	16,20	17,50	18,90	20,00	21,50	23,1	25,1	—	—	—	—	5,10
14,60	15,10	16,30	17,50	18,90	20,40	21,70	23,30	25,0	27,2	—	—	—	—	5,50
15,00	16,20	17,50	18,90	20,30	21,90	23,30	25,10	26,8	29,2	—	—	—	—	5,90
16,30	17,60	19,00	20,50	22,10	23,80	25,30	27,30	29,2	31,7	34,3	37,5	—	—	6,40
17,70	19,00	20,60	22,10	23,90	25,70	27,40	29,50	31,5	34,3	37,1	40,5	—	—	6,90
19,00	20,40	22,10	23,60	25,60	27,60	29,40	31,70	33,9	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	7,40
20,50	22,10	23,90	25,70	27,70	29,90	31,90	34,30	36,7	39,9	43,1	47,1	51,1	55,1	8,00
22,10	23,80	25,70	27,70	29,80	32,20	34,40	36,90	39,5	43,0	46,4	50,7	55,0	59,30	8,60
24,00	25,80	27,90	30,00	32,30	34,80	37,20	40,00	42,8	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	9,30
25,80	27,80	30,00	32,30	34,80	37,50	40,10	43,10	46,1	50,1	54,1	59,1	64.1	69,1	10,00
27,90	30,10	32,40	34,90	37,60	40,50	43,40	46,60	49,9	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	10,80
30,00	32,30	34,90	37,50	40,50	43,60	46,70	50,10	53,6	58,3	62,9	68,7	75,5	80,4	11,60
32,40	34,90	37,60	40,50	43,60	47,00	50,40	54,10	57,9	62,9	67,9	74,1	80,4	86,6	12,50
35,00	37,70	40,70	43,80	47,20	50,80	54,50	58,50	62,6	68,0	73,4	80,1	86,9	93,6	13,50
37,60	40,50	43,70	47,10	50,60	54,60	58,60	62,90	67,3	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	14,50
—	43,70	47,10	50,70	54,60	58,80	63,10	67,60	72,4	78,7	84,9	92,7	100,5	108,3	15,60
—	47,00	50,70	54,60	58,80	63,30	68,00	73,00	78,1	84,8	91,5	99,9	108,3	116,7	16,80
—	—	54;40	58,50	63,00	67,90	72,90	78,30	83,70	90,90	98,10	107,1	116,1	125,1	18,00

размеры проводов ПБО, ПБД. Тонкой штриховой линией ограничены размеры проводов ПДА, жирной—проводов

Таблица IV-4

Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов





Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции															
	круглого года $D-d$, *мм*, при диаметре голого провода d, *мм*													прямоугольного провода $B-b$, *мм*; при меньшей стороне сечения голого провода, *мм*		
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,49	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45	1,50—1,56	1,62—2,1	2,26—5,00	5,00—5,20	0,83—1,95	2,1—3,8	4,1—5,5
ПБО	—	—	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	0,14	—	—	0,14	0,175	0,23
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—	0,27	0,27	0,27	0,33	0,35	0 27	0,33	0,44
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1—0,12	0,15	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0;45	0,45	0,50

Таблица IV-5

Номинальные размеры прямоугольной проволоки (*мм*) и расчетные сечения (*мм*²) (ГОСТ 434-53)

b	*a*																		
	0,83	0,90	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,81	1,95	2,00	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63
2,1	1,60	1,72	1,89	2,06	2,23	2,42	2,63	2,84	—	3,07	3,32	3,32	—	—	3,92	—	—	—	—
2,26	—	1,86	2,05	2,23	2,41	2,62	2,84	3,07	—	3,32	3,59	3,83	—	—	—	4,63	—	—	—
2,44	—	2,03	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,33	—	3,60	3,89	4,21	4,55	—	4,64	—	5,37	—	—
2,63	—	2,20	2,42	2,63	2,84	3,08	3,34	3,60	—	3,80	4,21	4,55	4,92	—	5,04	5,46	5,94	—	6,44
2,83	—	2,38	2,62	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	—	4,20	4,54	4,91	5,31	—	5,46	5,92	6,43	—	—
3,05	—	—	2,84	3,08	3,33	3,60	3,91	4,21	—	4,55	4,91	5,31	5,74	—	5,93	6,41	6,96	—	7,54
3,28	—	—	3,07	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	—	4,91	5,30	5,73	6,19	—	6,41	6,93	7,52	—	8,15
3,53	2,79	—	3,32	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	—	5,30	5,72	6,18	6,67	—	6,93	7,50	8,13	—	8,80
3,8	—	3,25	3,59	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	—	5,72	6,17	6,67	7,20	—	7,50	8,11	8,79	—	9,51
4,1	—	—	3,89	4,22	4,55	4,92	5,33	5,74	—	6,19	6,68	7,21	7,79	—	8,13	8,79	9,52	—	10,3
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—
4,4	—	—	4,19	4,54	4,89	5,29	5,73	6,17	—	6,65	7,18	7,75	8,37	—	8,76	9,46	10,2	—	11,1
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,8	—	—	—	—	—
4,7	—	—	4,90	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	—	7,12	7,79	8,30	8,96	—	9,39	10,1	11,0	—	11,9
5,1	—	—	4,89	5,30	5,71	6,17	6,68	7,19	—	7,75	8,36	9,02	9,74	—	10,2	11,0	11,9	—	12,9
5,5	—	—	5,29	5,73	6,17	6,67	7,22	7,77	—	8,37	9,03	9,75	10,5	—	11,1	11,9	12,9	13,3	14,0
5,9	—	—	5,69	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	—	8,99	9,70	10,5	11,3	—	11,9	12,8	13,9	—	15,0
6,4	—	—	6,19	6,70	7,21	7,79	8,43	9,07	—	9,77	10,6	11,4	12,3	—	12,9	14,0	15,1	—	16,3
6,9	—	—	6,69	7,24	7,79	8,42	9,11	9,79	—	10,6	11,4	12,3	13,3	—	14,0	15,1	16,3	—	17,7
7,4	—	—	7,19	7,78	8,37	9,04	9,78	10,5	—	11,3	12,6	13,3	14,2	—	15,0	16,2	17,6	—	19,0
8,0	—	—	7,79	8,43	9,07	9,79	10,6	11,4	—	12,3	13,2	14,4	15,4	—	16,3	17,6	19,0	—	20,5
8,6	—	—	8,39	9,08	9,77	10,6	11,4	12,3	—	13,2	14,2	15,5	16,6	—	17,6	18,9	20,5	—	22,1
9,3	—	—	—	9,83	10,58	11,4	12,4	13,3	—	14,3	15,4	16,6	17,9	—	19,0	20,5	22,2	—	24,0
10,0	—	—	—	—	11,40	12,3	13,3	14,3	14,8	15,4	16,6	17,9	19,3	19,8	20,5	22,1	23,9	24,5	25,8
10,8	—	—	—	—	—	—	14,4	15,5	—	16,6	17,9	19,3	20,9	—	22,2	23,9	25,9	—	27,9
11,6	—	—	—	—	—	—	15,5	16,6	—	17,9	19,3	20,8	22,4	—	23,9	25,7	27,8	—	30,0
12,5	—	—	—	—	—	—	—	17,9	18,5	19,4	20,8	22,4	24,2	24,8	25,8	27,8	30,0	30,8	32,4
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20,8	22,5	24,2	26,1	—	27,9	30,0	32,4	—	35,0
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24,2	26,1	28,0	—	30,0	32,3	34,9	—	37,6
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28,0	30,2	—	32,3	34,8	37,6	—	40,5
16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39,5	—
16,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32,6	—	34,8	37,5	40,5	—	43,7
18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37,3	40,2	43,4	—	46,8
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	43,6	47,1	—	50,8
20,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49,5	—
22,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57,4
25,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. IV-5

b	a																			
	2,83	3,00	3,05	3,28	3,53	3,80	4,0	4,1	4,4	4,7	5,0	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,5
2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,83	7,53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,05	8,15	—	8,72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,28	8,80	—	9,51	10,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,53	9,51	—	10,3	11,1	12,0	12,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,8	10,3	—	11,1	12,0	—	13,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,1	11,1	—	12,0	13,0	14,0	15,1	—	15,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,4	12,0	—	12,9	13,9	15,0	16,2	—	17,1	18,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,7	12,8	—	13,8	14,9	16,1	17,4	—	18,4	—	21,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,1	13,9	—	15,1	16,2	17,5	18,9	—	20,0	21,5	—	—	25,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	15,1	—	16,3	17,5	18,9	20,4	—	21,7	23,3	25,0	—	27,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,9	16,2	—	17,5	18,9	20,3	21,9	—	23,3	25,1	26,8	—	29,2	—	34,5	—	—	—	—	—	—	—
6,4	17,6	—	19,0	20,5	22,1	23,8	—	25,3	27,3	29,2	—	31,7	34,3	37,5	—	—	—	—	—	—	—
6,9	19,0	—	20,6	22,1	23,1	25,7	—	27,4	29,5	31,5	—	34,3	37,1	40,5	—	47,4	—	—	—	—	—
7,4	20,4	—	22,1	23,6	25,6	27,6	—	29,4	31,7	33,9	—	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	—	—	—	—	—
8,0	22,1	—	23,9	25,7	27,7	29,9	—	31,9	34,3	36,7	—	39,9	43,1	47,1	51,1	55,1	63,1	—	—	—	—
8,6	23,8	—	25,7	27,7	29,9	32,2	—	34,4	36,9	39,5	—	43,0	46,4	50,7	55,0	59,3	68,9	—	—	—	—
9,3	25,8	—	27,9	30,0	32,3	34,8	—	37,2	40,0	42,8	—	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	73,5	82,8	—	—	—
10,0	27,8	29,5	30,0	32,3	34,8	37,5	39,5	40,1	43,1	46,1	49,1	50,1	54,1	59,1	64,1	69,1	79,1	89,1	99,1	—	—
10,8	30,1	—	32,4	34,9	37,6	40,5	—	43,4	46,6	49,9	—	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	85,5	96,3	—	136,6	155,4
11,6	32,3	—	34,9	37,5	40,5	43,6	—	46,7	50,1	53,6	—	58,3	62,9	68,7	75,5	80,4	91,9	103,5	—	—	—
12,5	34,9	37,0	37,6	40,5	43,6	47,0	49,5	50,4	54,1	57,9	—	62,9	67,9	74,1	80,4	86,6	99,1	116,6	124,1	—	—
13,5	37,7	—	40,7	43,8	47,2	50,8	—	54,5	58,5	62,6	—	68,0	73,4	80,1	86,9	93,6	107,1	120,6	—	—	—
14,5	40,5	—	43,7	47,1	50,6	54,6	—	58,6	62,9	67,3	—	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	115,1	129,6	—	—	—
15,6	43,7	—	47,1	50,7	54,6	58,8	—	63,1	67,6	72,4	—	78,7	84,9	92,7	100,5	108,3	123,9	139,5	155,1	—	—
16,0	—	47,5	—	—	—	—	63,5	—	—	—	79,1	—	—	95,1	—	—	127,1	—	—	—	—
16,8	47,0	—	50,7	54,6	58,8	63,3	—	68,0	73,0	78,1	—	84,8	91,5	99,9	108,3	116,7	133,5	—	—	—	—
18,0	50,4	—	54,4	58,5	63,0	67,9	—	72,9	78,3	83,7	—	90,9	98,1	107,1	116,1	125,1	143,1	—	—	—	—
19,5	54,7	—	59,0	63,5	68,3	73,6	—	79,1	84,3	90,8	—	98,6	106,4	116,1	126,9	135,6	155,1	—	—	—	—
20,0	—	59,5	—	—	—	—	79,5	—	—	—	99,1	—	—	119,1	—	—	159,1	—	—	—	—
22,0	61,8	—	66,6	71,7	77,2	83,1	—	89,1	95,8	102,5	—	111,3	120,1	131,1	142,1	153,1	—	—	—	—	—
25,0	70,3	74,5	75,8	81,5	88,3	94,5	99,5	101,4	109,1	116,5	124,1	126,6	136,6	149,1	161,6	174,1	—	—	—	—	—
26,3	—	—	79,7	85,8	92,3	99,4	—	106,9	114,3	122,7	—	133,2	143,8	156,9	170,1	183,2	—	—	—	—	—
28,0	—	—	—	91,3	98,3	105,9	111,5	113,9	122,3	130,7	—	141,9	153,1	167,1	181,1	195,1	—	—	—	—	—
30,0	—	—	—	—	105,4	113,5	119,5	122,1	131,1	140,1	149,1	152,1	164,1	—	—	—	—	—	—	—	—
32,0	—	—	—	—	—	121,1	—	139,9	139,3	149,5	—	162,3	175,1	—	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	—	—	—	132,5	139,5	142,6	153,1	163,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения даны с учетом закруглений углов.

Таблица IV-6

Номинальные размеры (*мм*) и расчетные сечения лент (*мм*²)

b	a: 0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,03	1,16	1,25	1,35
8	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	4,30	5,16	6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65	5,58	6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
10	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	9,78	10,6	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4	6,48	7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8	6,96	8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5,0	6,25	7,5	8,75	10,0	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75	8,1	9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
14	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
16	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,0	9,6	11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4	10,1	11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9,0	10,8	12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
20	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	—	—	—	—	—
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11,0	13,2	15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2	15,8	18,4	21,0	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
28	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	11,2	14,0	16,8	19,6	22,4	25,2	27,8	30,0	32,2	34,7	37,4
30	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
32	3,2	4,8	6,4	8,0	9,6	12,8	16,0	19,2	22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5	—	24,5	28,0	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
40	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	39,8	43,0	46,1	49,7	53,6
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5	—	31,5	36,0	—	44,8	—	—	55,9	60,4
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	5,0	7,5	10	12,5	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
55	—	—	—	—	16,5	—	27,5	—	38,5	44,0	—	54,8	—	—	—	—
60	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0	59,8	64,6	69,3	74,4	80,6
65	—	—	—	—	—	—	—	—	45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
70	—	—	14,0	—	21,0	28,0	35,3	42,0	—	56,0	63,0	69,8	—	—	—	—
75	—	—	—	—	22,5	30,0	37,5	45,0	52,5	60,0	67,5	74,8	—	—	—	—
80	—	—	16,0	—	24,0	32,0	40,0	48,0	—	64,0	72,0	79,8	—	—	—	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72,0	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20,0	—	—	—	50,0	—	—	80,0	—	99,8	—	—	—	—

Продолжение табл. IV-6

b	a															
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2,0	2,1	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83	3,0	3,28	3,53
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40,0	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,7	—	—	—
28	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—	57,9	62,2	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	91,1	—
32	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6	78,0	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45	64,8	—	69,7	75,0	80,8	86,9	—	93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113,4	—	—	—	—	—	—
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6	123,2	132,9	—	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Примечание. Для лент толщиной 1 *мм* и более расчетные сечения указаны с учетом закруглений углов.

Таблица IV-7

Номинальные размеры (*мм*) и расчетные сечения шин (*мм*²)

b	a																	
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7	8	9	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	175,1	199,1	223,1	255,1	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	199,1	224,1	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1	—	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	356,6	384,1	439,1	494,1	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	419,1	479,1	539,1	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—	584,1	649,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	559,1	629,1	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1	—	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1	—	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1	—	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1	—	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

ЩЕТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

РАЗМЕРЫ (по ГОСТ 12232-66)

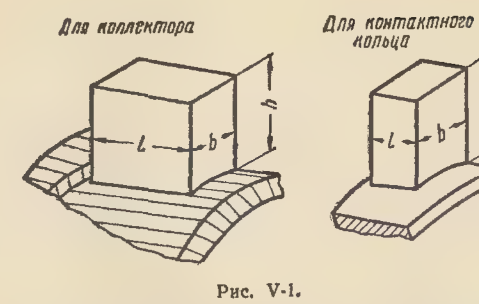


Рис. V-1.

b — тангенциальный размер; *l* — осевой размер; *h* — радиальный размер. У щеток, предназначенных для использования на контактных кольцах, размеры *b* и *l* допускается менять местами.

Таблица V-1

Размеры (*мм*)

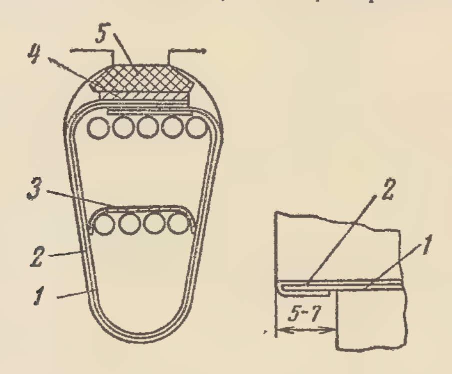
b	5	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	32,0
l	6,3; 8,0; 10,0	10,0; 12,5	10,0; 12,5; 16,0; 20,0	12,5; 25,0; 40,0	16,0; 20,0; 32,0; 40,0; 50,0	20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0	32,0; 40,0; 50,0	32,0; 40,0	50,0

Примечание. Размер $h=6,3\div80,0$ зависит от размеров *b* и *l*.

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Таблица VI-1

Пазовая изоляция нормального исполнения всыпных обмоток якорей машин постоянного тока мощностью 0,6—9 *квт*; напряжение до 500 *в*



Класс изоляции	Позиция на рисунке	Материал: наименование	Материал: толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Двусторонняя толщина изоляции, *мм*: по ширине	Двусторонняя толщина изоляции, *мм*: по высоте
A	*1*	Стеклолакоткань эскапоновая	0,2	2	3	0,4	0,6
	2	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6
	3	То же	0,5	—	1	—	0,5
	4	» »	0,5	—	1	—	0,5
	5	Клин деревянный	2,0	—	1	—	2,0
		Всего на паз без клина	—	—	—	0,8	2,2
E	*1*	Пленкоэлектрокартон на полиэтилентерефталатной пленке	0,27	2	3	0,54	0,81
	3	То же	0,27	—	1	—	0,27
	4	» »	0,27	—	1	—	0,27
	5	Клин деревянный	2,0	—	1	—	2,0
		Всего на паз без клина	—	—	—	0,54	1,35
B/F, все исполнения	*1*	Миканит гибкий	0,35	2	3	0,7	1,05
	2	Стеклолакоткань	0,2/0,15	2	3	0,4/0,3	0,6/0,45
	3	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
	4	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
	5	Клин стеклотекстолитовый	2,0	—	1	—	2,0
		Всего на паз без клина	—	—	—	1,1/1,0	2,65/2,50

Примечание. Размеры, приведенные в виде отношения: в числителе — для изоляции класса B, в знаменателе — класса F.

Таблица VI-2

Изоляция лобовых частей, подбандажная и вала якорей машин постоянного тока мощностью 0,6—9 *квт*, напряжение до 500 *в*

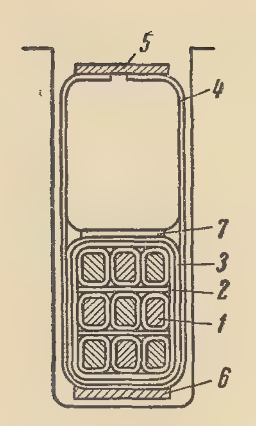
Класс изоляции	Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Число слоев	Класс изоляции	Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Число слоев
А, нормальное исполнение	*1*	Электрокартон	0,3—0,5	2	Е, нормальное исполнение	*1*	Пленкоэлектрокартон	0,27	2
	2	Стеклолакоткань эскапоновая	0,2	1—2		*2*	Лента стеклянная	0,1	1 в полнахлеста
	3	Лента тафтяная	0,25	1 в полнахлеста		*3*	—	—	1
	4	Электрокартон ЭВ	0,5	1		*4*	Пленкоэлектрокартон	0,27	1
	5	Электрокартон ЭВ	0,3—0,5	1		*5*	Пленкоэлектрокартон	0,27	1—2
	6	Электрокартон ЭВ	2,0	1		*6*	Электронит	2,0	1
	7	Чулок хлопчатобумажный (или лента тафтяная)	2(0,25)	Переплести		*7*	Стеклочулок (или стеклолента)	2(0,2)	Переплести
	8	То же	2(0,25)	1		*8*	Стеклочулок	2	1
	9	Миканит формовочный	0,15	—		*9*	Миканит формовочный	0,15	—
	10	Миканит коллекторный	0,6—0,8	—		*10*	Миканит коллекторный	0,6—0,8	1
	11	Миканит формовочный	0,3—0,5	—		*11*	Миканит формовочный	0,3—0,5	—
	12	Стеклолакоткань эскапоновая	0,2	1		*12*	Пленкоэлектрокартон	0,27	3
	13	Лента киперная	0,45	1 вполнахлеста		*13*	Лента стеклянная	0,2	2 вполнахлеста
	14	Электрокартон	0,2	2		*14*	Пленкоэлектрокартон	0,27	1

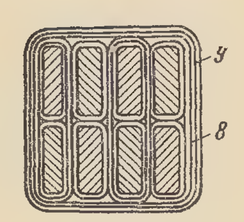
Класс изоляции	Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Число слоев
В, все исполнения	*1*	Электрокартон	0,3—0,5	2
	2	Миканит гибкий	0,2	1
	3	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста
	4	Лакостекломиканит	0,5	1
	5	Электронит	0,2	1
	6	Миканит гибкий (электронит)	0,2 (2)	1 (1)
	Позиции *7, 8, 9, 10, 11, 13* те же, что и для кл. Е			
	12	Миканит гибкий	0,2	1
	14	Электронит	0,2	2
F, все исполнения	*1*	Стеклолакоткань	0,15	2
	2	Миканит гибкий	0,2	2
	3	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста
	4	Лакостекломиканит	0,5	1
	5	Миканит гибкий	0,2	—
	6	Электронит	2,0	1
	Позиции *7—14* те же, что и для кл. В			

Примечание. Пленкоэлектрокартон состоит из электрокартона ЭВТ толщиной 0,2 *мм* с подклейкой полиэтилентерефталатной пленкой толщиной 0,05 *мм*.

Таблица VI-3

Изоляция пазовой (*а*) и лобовых (*б*) частей обмоток якоря машин постоянного тока мощностью 10—200 *квт*; напряжение до 500 *в*





Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение					
		Материал		Число слоев		Толщина, *мм*	
		Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая		Провод	—	—	—	—	—
	1	Стеклолакоткань эскапоновая	0,2	2,5 оборота		1	1
	2	Лента тафтяная	0,25	1 встык		0,5	0,5
	3	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,2	0,3
		Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	—	—	—	1,7	1,8
	4	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6
	5	То же	0,5	—	1	—	0,5
	6	» »	0,3	—	1	—	0,3
	7	» »	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	2,4	6,0
Лобовая	8	—	—	—	—	—	—
	9	Лента тафтяная	0,25	1 вполнахлеста		1,0	1,0
		Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,3	0,4
		Общая толщина изоляции на якорную катушку	—	—	—	1,3	1,4
		Класс В, нормальное исполнение					
Пазовая	1	Провод	—	—	—	—	—
	2	Миканит гибкий	0,2	2,5 оборота		1,0	1,0
	3	Лента стеклянная	0,1	1 встык		0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,2	0,3
		Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	—	—	—	1,4	1,5
	4	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6
	5	То же	0,5	—	1	—	0,5
	6	» »	0,3	—	1	—	0,3
	7	Миканит прокладочный	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	2,1	5,4

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение					
		Материал		Число слоев		Толщина, *мм*	
		Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Лобовая	8	—	—	—	—	—	—
	9	Лента стеклянная	0,1	1 вполнахлеста		0,4	0,4
		Разбухание от пропитки	—	—	—	0,2	0,3
		Общая толщина на одну якорную катушку	—	—	—	0,6	0,7

Таблица VI-4

Гильзовая и непрерывная изоляция якорных катушек машин постоянного тока

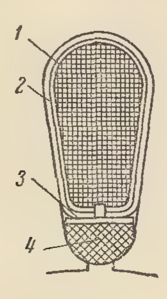
Часть обмотки		Позиция на рисунке к табл. VI-3	Класс А, нормальное и усиленновлагостойкое исполнение									
			Материал		Для напряжения до 500 *в*				Для напряжения 600—1 000 *в*			
					Число слоев		Толщина изоляции, *мм*		Число слоев		Толщина изоляции, *мм*	
			Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Изоляция катушки	Гильзовая	1	Провод	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	Микафолий	0,2	5	5	1,0	1,0	7	7	1,4	1,4
		3	Бумага телефонная лакированная	0,05	3	3	0,15	0,15	3	3	0,15	0,15
			Двусторонняя толщина изоляции	—	—	—	1,15	1,15	—	—	1,55	1,55
	Непрерывная	1	Провод	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	Микалента	0,17	2 вполнахлеста		1,36	1,36	3 вполнахлеста		2,04	2,04
		3	Лента стеклянная	0,2	1 встык		0,4	0,4	1 встык		0,4	0,4
			Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,24	0,24	—	—	0,26	0,26
			Толщина изоляции одной катушки	—	—	—	2,0	2,0	—	—	2,7	2,7
Пазовая часть обмотки		4	Электронит	0,2	2	3	0,4	0,6	2	3	0,4	0,6
		5	Текстолит В	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
		6	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
		7	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
			Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5	—	—	0,3	0,5
			Всего на паз:									
			а) при гильзовой изоляции	—	—	—	1,9	5,2	—	—	2,25	5,7
			б) при непрерывной изоляции	—	—	—	2,7	6,6	—	—	3,4	8,0

Часть обмотки		Позиция на рисунке к табл. VI-3	Класс А, нормальное и усиленновлагостойкое исполнение									
			Материал		Для напряжения до 500 *в*				Для напряжения 600—1 000 *в*			
			Наименование	Толщина, *мм*	Число слоев		Толщина изоляции, *мм*		Число слоев		Толщина изоляции, *мм*	
					по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Класс В тропическое и химостойкое исполнение; классы F и H все исполнения												
	Гильзовая	*1*	Провод	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	Стекломикафолий	0,2	5	5	1,0	1,0	7	7	1,4	1,4
		3	Двусторонняя толщина изоляции	—	—	—	1,0	1,0	—	—	1,4	1,4
Изоляция катушки	Непрерывная	*1*	Провод	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		2	Стекломикалента	0,17	2 вполнахлеста		1,36	1,36	3 вполнахлеста		2,04	2,04
		3	Лента стеклянная	0,2	1 встык		0,4	0,4	1 встык		0,4	0,4
			Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,24	0,24	—	—	0,26	0,26
			Толщина изоляции одной катушки	—	—	—	2,0	2,0	—	—	2,7	2,7
Пазовая часть обмотки		*4*	Стеклолакоткань	0,15	2	3	0,3	0,45	2	3	0,3	0,45
		5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
		6	То же	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
		7	» »	0,5	—	1	—	0,5	—	1	—	0,5
			Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,55	—	—	0,3	0,55
			Всего на паз:									
			а) при гильзовой изоляции	—	—	—	1,6	4,5	—	—	2,0	5,3
			б) при непрерывной изоляции	—	—	—	2,6	6,5	—	—	3,3	7,9

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Таблица VII-1

Изоляция однослойных статорных обмоток (всыпных) из мягких секций при полузакрытых пазах для машин на напряжение до 690 *в*



Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение. Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Толщина, *мм*: по ширине	Толщина, *мм*: по высоте
Пазовая	*1*	Стеклолакоткань *	0,2	2	2	0,4	0,4
	2	Электрокартон ЭВ	0,2	2	2	0,4	0,4
	3	То же	0,5	—	1	—	0,5
	4	Клин (бук, береза)	Не менее 2,5	—	1	—	—
		Всего на паз без клина	—	—	—	0,8	1,3
Класс Е, нормальное исполнение							
Пазовая	*1*	Пленкоэлектрокартон**	0,27	2	2	0,54	0,54
	2	—	—	—	—	—	—
	3	Пленкоэлектрокартон**	0,27	—	1	—	0,27
	4	Клин текстолитовый	Не менее 2,5	—	1	—	—
		Всего на паз без клина	—	—	—	0,55	0,8
Класс В, F и Н, все исполнения							
Пазовая	*1*	Стеклолакоткань *	0,15	2	2	0,3	0,3
	2	Гибкий стекломиканит*	0,3	2	2	0,6	0,6
	3	Стеклотекстолит*	0,5	—	1	—	0,5
	4	Стеклотекстолит*	Не менее 2,5	—	1	—	—
		Всего на паз без клина	—	—	—	0,9	1,4

* Материал со связующими, соответствующими указанным классам нагревостойкости; гибкий стекломиканит для машины с изоляцией класса В нормального исполнения может быть заменен гибким слюдинитом или гибким стеклослюдинитом.

** Склеен из полиэтилентерефталатной пленки толщиной 0,05 *мм* и электрокартона ЭВТ толщиной 0,2 *мм*.

Таблица VII-2

Изоляция двухслойных статорных обмоток (всыпных) из мягких секций при полузакрытых пазах для машин нормального исполнения на напряжение до 600 в

Рисунок	Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс, А: Материал: Наименование	Класс, А: Материал: Толщина, мм	Класс, А: Количество слоев: по ширине	Класс, А: Количество слоев: по высоте	Класс, А: Толщина изоляции, мм: по ширине	Класс, А: Толщина изоляции, мм: по высоте	Класс, Е: Материал: Наименование	Класс, Е: Материал: Толщина, мм	Класс, Е: Количество слоев: по ширине	Класс, Е: Количество слоев: по высоте	Класс, Е: Толщина изоляции, мм: по ширине	Класс, Е: Толщина изоляции, мм: по высоте
	Пазовая	1	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	Пленкоэлектрокартон	0,27	2	3	0,54	0,8
		2	Эскапоновая стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6	Электрокартон ЭВ	0,27	2	3	0,54	0,8
		3	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	—	—	—	—	—	—
		4	То же	0,5	—	1	—	0,5	Пленкоэлектрокартон	0,27	—	2	—	0,54
		5	» »	0,5	—	1	—	0,5	То же	0,27	—	1	—	0,27
		6	Клин (бук, береза)	Не менее 2,5	—	1	—	—	Клин (бук, береза)	Не менее 2,5	—	1	—	—
			Всего на паз без клина	—	—	—	1,2	2,8	—	—	—	—	1,1	2,4
	Лобовая	4	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5	Пленкоэлектрокартон	0,27	—	2	—	0,54
		7	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		—	1,0	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
		8	Чулок хлопчатобумажный	—	—	—	—	—	Чулок стеклянный	—	—	—	—	—
		9	Эскапоновая стеклолакоткань	0,2	1 слой вполнахлеста		—	0,8	Стеклолакоткань	0,2	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4

Рисунок	Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс, B						Класс, F					
			Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
			Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
См. рисунок на стр. 606	Пазовая	*1*	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	Электронит	0,2	2	3	0,4	0,6
		2	Гибкий миканит*	0,2	2	3	0,4	0,6	Гибкий стекломиканит	0,35	2	3	0,7	1,05
		3	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6	Стеклолакоткань	0,15	2	3	0,3	0,45
		4	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
		5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
		6	Клин текстолитовый	Не менее 2,5	—	1	—	—	Клин стеклотекстолитовый	Не менее 2,5	—	1	—	—
			Всего на паз без клина	—	—	—	—	1,2	2,8	—	—	—	1,4	3,1
См. рисунок на стр. 606	Лобовая	*4*	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
		7	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		—	0,4	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
		8	Стеклянный чулок	—	—	—	—	—	Стеклянный чулок	—	—	—	—	—
		9	Стеклолакоткань	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8	Стекломикалента	0,13	1 слой вполнахлеста		0,52	0,52

* Допускается применение гибкого стеклослюдинита.

Продолжение табл. VII-2

Рисунок	Часть обмотки	Позиция на рисунке	Класс Н					
			Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
			Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
См. рисунок на стр. 606	Пазовая	*1*	Стеклолакоткань	0,15	2	3	0,3	0,45
		2	Гибкий стекломиканит	0,35	2	3	0,7	1,05
		3	Стеклолакоткань	0,15	2	3	0,3	0,45
		4	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
		5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
		6	Клин стеклотекстолитовый	Не менее 2,5	—	1	—	—
			Всего на паз без клина	—	—	—	1,3	2,95
См. рисунок на стр. 606	Лобовая	*4*	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
		7	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
		8	Стеклянный чулок	—	—	—	—	—
		9	Стекломикалента	0,17	1 слой вполнахлеста		0,68	0,68

Таблица VII-3

Изоляция двухслойных статорных обмоток из жестких секций при полуоткрытых пазах для машин нормального исполнения на напряжение до 690 *в*. Класс изоляции А

Часть обмотки		Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Толщина изоляции, *мм*: по ширине	Толщина изоляции, *мм*: по высоте
Пазовая	На полукатушку	1	Бумага телефонная, лакированная (бакелитовый лак)	0,07	3	2	0,2	0,15
	На катушку		То же	—	6	4	0,4	0,3
	На паз	2	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6
		3	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6
		4	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6
		5	То же	0,5	—	1	—	0,5
		6	» »	0,5	—	1	—	0,5
		7	» »	0,5	—	1	—	0,5
		8	Клин (бук. береза)	Не менее 2,5	—	—	—	—
			Допуск на укладку	—	—	—	+0,6	+0,8
			Всего на паз без клина	—	—	—	2,2	4,4
Лобовая	Средних полукатушек в группе	9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0
	Первой и последней полукатушек в группе	10	Стеклолакоткань	0,20	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
		9	Лента тафтяная	0,25	То же		1,0	1,0

Таблица VII-4

Изоляция двухслойных статорных обмоток из жестких секций при полуоткрытых пазах для машин нормального и влагостойкого исполнений. Класс изоляции В

Часть обмотки		Позиция на рисунке	Материал: Наименование	Материал: Толщина, *мм*	Количество слоев: по ширине	Количество слоев: по высоте	Толщина изоляции, *мм*: по ширине	Толщина изоляции, *мм*: по высоте
Пазовая	На полукатушку	1	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	2	0,2	0,15
	На катушку		То же		6	4	0,4	0,3
	На паз	2	Лакослюдопласт	0,5	2	3	1,0	1,5
		3	»	0,5	—	1	—	0,5
		4	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
		5	»	0,5	—	1	—	0,5
		6	Клин стеклотекстолитовый	Не менее 2,5	—	—	—	—
			Допуск на укладку	—	—	—	+0,4	+0,6
			Всего на паз без клина	—	—	—	1,8	3,9
Лобовая	На полукатушку		Разбухание изоляции меди от промазки	—	—	—	0,1	0,2
		7	Стеклолакоткань	0,15	1 вполнахлеста	1	0,6	0,6
		8	Лента стеклянная	0,2	1 вполнахлеста	1	0,8	0,8

Таблица VII-5

Гильзовая изоляция (твердая гильза) статорных обмоток при открытых пазах для машин различных исполнений на напряжение до 690 *в*

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Класс В, нормальное и усиленновлагостойкое исполнение						Класс В, химостойкое и тропическое исполнение, классы F и H, все исполнения					
				Наименование материала	Толщина, *мм*	Количество слоев по ширине	Количество слоев по высоте	Толщина изоляции, *мм*, по ширине	Толщина изоляции, *мм*, по высоте	Наименование материала	Толщина *мм*	Количество слоев по ширине	Количество слоев по высоте	Толщина изоляции, *мм*, по ширине	Толщина изоляции, *мм*, по высоте
	Пазовая	На катушечную сторону	1	Лента стеклянная	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2	Лента стеклянная	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
			2	Микафолий	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4	Стекломикафолий *	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	1,6	1,6	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	1,6	1,6
		На паз	3	Электронит	0,2	2	3	0,4	0,6	Стеклолакоткань *	0,15	2	3	0,3	0,45
			4	»	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит *	0,5	—	1	—	0,5
			5	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5	Лакостекломиканит*	0,5	—	1	—	0,5
			6	Текстолит	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит *	0,5	—	1	—	0,5
			7	Клин текстолитовый	Не менее 3	—	1	—	—	Клин текстолитовый	Не менее 3	—	1	—	—
				Допуск на укладку	—	—	—	+0,3	10,5	Допуск на укладку	—	—	—	+0,3	+0,5
				Всего на паз без клина	—	—	—	2,3	5,8	Всего на паз без клина	—	—	—	2,2	5,7
	Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4	Стекломикалента	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4
			9	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
			10	То же	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2	То же	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
				Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,5	0,5	Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—	0,5	0,5

* Материалы со связующими, соответствующими указанным классам нагревостойкости.

Таблица VII-6

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток при открытых пазах для машин различных исполнений на напряжение до 690 в

Часть обмотки		Позиция на рис. к табл. VII-5	Класс А, усиленновлагостойкое исполнение						Класс Е и В, химостойкое и тропическое исполнение					
			Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
			Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	На катушечную сторону	1	Микалента	0,13	3 слоя вполнахлеста		1,6	1,6	Микалента	0,13	3 слоя вполнахлеста		1,6	1,6
		2	Лента тафтяная	0,25	1 слой встык		0,5	0,5	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык		0,2	0,2
			Разбухание изоляции от компаундирования	—	—	—	0,8	1,2	Разбухание изоляции от компаундирования	—	—	—	0,7	1,1
			Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	2,9	3,3	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	2,5	2,9
	На паз	3	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6
		4	То же	0,5	—	1	—	0,5	То же	0,5	—	1	—	0,5
		5	» »	0,5	—	1	—	0,5	Лакостекломиканит	0,5	—	1	—	0,5
		6	» »	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
		7	Клин текстолитовый	Не менее 3	—	—	—	—	Клин стеклотекстолитовый	Не менее 3	—	—	—	—
			Допуск на укладку	—	—	—	+0,3	+0,5	Допуск на укладку	—	—	—	+0,3	+0,5
			Всего на паз без клина	—	—	—	3,6	9,2	Всего на паз без клина	—	—	—	3,2	8,4
Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,13	3 слоя вполнахлеста		1,6	1,6	Микалента	0,13	3 слоя вполнахлеста		1,6	1,6
		9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0	Лента стеклянная	0,10	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
			Разбухание изоляции от компаундирования	—	—	—	1,2	1,5	Разбухание изоляции от компаундирования	—	—	—	1,0	1,2
			Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	3,8	4,1	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	3,0	3,2

Таблица VII-7

Гильзовая изоляция статорных обмоток на напряжения 3 000—3 150 в

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение					
				Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
				Наименование	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	Пазовая	На катушечную сторону	2	Микафолий	0,2	6,5		2,6	2,6
			3	Бумага намоточная лакированная	0,1	2,5		0,5	0,5
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	3,1	3,1
		На паз	4	Электрокартон ЭВ	0,3	2	3	0,6	0,9
			5	То же	0,5	—	2	—	1,0
			6	» »	1,0	—	1	—	1,0
				Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,5
				Всего на паз без клина	—	—	—	4,2	9,6
	Лобовая	На катушечную сторону	8	—	—	—	—	—	—
			9	Стеклолакоткань	0,2	4 слоя вполнахлеста		3,2	3,2
			10	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0
				Разбухание от пропитки	—	—	—	0,3	0,3
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		4,5	4,5

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Класс B, нормальное и усиленновлагостойкое исполнение						Класс F, все исполнения					
				Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
				Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
См. рисунок на стр. 612	Пазовая	На катушечную сторону	2	Микафолий	0,2	6,5 оборота		2,6	2,6	Стеклолента	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
			3	Бумага намоточная лакированная	0,1	2,5 оборота		0,5	0,5	Стекломикафолий	0,2	6,5 оборота		2,6	2,6
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		3,1	3,1	Толщина изоляции катушечной стороны	—		—	2,8	2,8
		На паз	4	Электронит	0,3	2	3	0,6	0,9	Стеклолакоткань	0,15	2	3	0,3	0,45
			5	»	0,5	—	2	—	1,0	Стеклотекстолит	0,5	—	2	—	1,0
			6	»	1,0	—	1	—	1,0	То же	1,0	—	1	—	1,0
				Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,5	Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,5
				Всего на паз без клина	—	—	—	4,2	9,6	Всего на паз без клина	—	—	—	3,6	8,6
См. рисунок на стр. 612	Лобовая	На катушечную сторону	8	Лента стеклянная	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2	Лента стеклянная	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
			9	Микалента	0,17	4 слоя вполнахлеста		2,8	2,8	Стекломикалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
			10	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
				Разбухание от пропитки	—	—		0,3	0,3	Разбухание от пропитки	—	—		0,5	0,5
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		3,7	3,7	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		3,7	3,7

Примечания: 1. Позиция 7 — клин деревянный (бук, береза), стеклотекстолитовый имеет высоту, примерно равную одной трети ширины паза, но не менее 3 *мм*.
2. Позиция 1 — см. табл. 4-10.

Таблица VII-8

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжения 3 000—3 150 *в*

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение						Класс Е, все исполнения и класс А, химостойкое исполнение					
				Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
				Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	Пазовая	На катушечную сторону	2	Микалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6	Микалента	0,13	6 слоев вполнахлеста		3,1	3,1
			3	Лента тафтяная	—	1 слой встык		0,5	0,5	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык		0,2	0,2
				Разбухание от компаундирования	—	—		0,7	2,0	Разбухание от компаундирования	—	—		0,7	2,0
				Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		3,8	5,1	—	—	—		4,0	5,3
		На паз	4	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
			5	То же	1,0	—	1	—	1,0	»	1,0	—	1	—	1,0
			6	» »	0,5	—	1	—	0,5	»	0,5	—	1	—	0,5
				Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5	Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
				Всего на паз без клина	—	—	—	4,1	12,7	Всего на паз без клина	—	—	—	4,3	13,1
	Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6	Микалента	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
			9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
				Разбухание от компаундирования	—	—		1,0	2,5	Разбухание от компаундирования	—	—		1,0	2,5
				Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		4,6	6,1	Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		4,0	5,5

Примечания те же, что и к табл. VII-7.

Таблица VII-9

Непрерывная компаундированная изоляция статорных обмоток на напряжения 6 000—6 300 *в*

Часть обмотки		Позиция на рисунке к табл. VII-8	Класса А, нормальное исполнение: Материал — Наименование	Толщина, *мм*	Количество слоев по ширине	Количество слоев по высоте	Толщина изоляции, *мм*, по ширине	Толщина изоляции, *мм*, по высоте	Класс Е, все исполнения и класс А, химостойкое исполнение: Наименование	Толщина, *мм*	Количество слоев по ширине	Количество слоев по высоте	Толщина изоляции, *мм*, по ширине	Толщина изоляции, *мм*, по высоте
Пазовая	На катушечную сторону	2	Микалента	0,17	7 слоев вполнахлеста		4,7	4,7	Микалента	0,13	9 слоев вполнахлеста		4,7	4,7
		3	Лента тафтяная	0,25	1 слой встык		0,5	0,5	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык		0,2	0,2
			Разбухание от компаундирования	—	—		5,4	2,25	Разбухание от компаундирования	—	—		0,2	2,25
			Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		5,4	7,45	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—		5,1	7,15
	На паз	4	Электрокартон ЭВ	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
		5	То же	1,0	—	1	—	1,0	»	1,0	—	1	—	1,0
		6	» »	0,5	—	1	—	1,0	»	0,5	—	1	—	1,0
			Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5	Допуск на укладку	—	—	—	0,3	0,5
			Всего на паз без клина	—	—	—	5,7	17,9	Всего на паз без клина	—	—	—	5,4	17,3
Лобовая	На катушечную сторону	8	Микалента	0,17	6 слоев вполнахлеста		4,1	4,1	Микалента	0,13	8 слоев вполнахлеста		4,2	4,2
		9	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
			Разбухание от компаундирования	—	—		0,5	3,0	Разбухание от компаундирования	—	—		0,5	3,0
			Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		5,6	8,1	Толщина изоляции на катушечную сторону	—	—		5,1	7,6

Примечания те же, что и к табл VII-7.

Таблица VII-10

Изоляция обмоток ротора асинхронных двигателей мощностью до 100 *квт*

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Класс А, нормальное исполнение						Класс В, нормальное исполнение: *классы* А *и* В, усиленновлагостойкое, тропическое и химически стойкое исполнения					
				Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*		Материал		Количество слоев		Толщина изоляции, *мм*	
				Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте	Наименование	Толщина, *мм*	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	Пазовая	На одну катушечную сторону	*1*	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	2	0,21	0,14	Лента стеклянная	0,1	1 слой вразбежку		0,1	0,1
										Разбухание изоляции меди от промазки лаком	—	—	—	0,2	0,2
				Толщина изоляции катушечной стороны				0,2	0,15	Толщина изоляции катушечной стороны	—	—	—	0,3	0,3
		На паз	*2*	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6
			3	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6	Гибкий миканит	0,2	2	3	0,4	0,6
			4	Электрокартон ЭВ	0,2	2	3	0,4	0,6	Стеклолакоткань	0,2	2	3	0,4	0,6
			5	То же	0,5	—	1	—	0,5	Стеклотекстолит	0,5	—	1	—	0,5
			6	» »	0,5	—	1	—	0,5	»	0,5	—	1	—	0,5
			7	» »	0,5	—	1	—	0,5	»	0,5	—	1	—	0,5
				Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,8	Допуск на укладку	—	—	—	0,5	0,8
				Всего на паз без клина	—	—	—	1,9	4,4	Всего на паз без клина	—	—	—	2,0	4,7
	Лобовая, на одну катушку в группе	Средней катушки в группе	*9*	Лента тафтяная	0,25	1 слой вполнахлеста		1,0	1,0	Лента стеклянная	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
		Первой и последней катушек в группе	*10*	Эскапоновая стеклолакоткань	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8	Стеклолакоткань	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
			11	Лента тафтяная	0,25	То же		1,0	1,0	Лента стеклянная	0,2	То же		0,8	0,8

Примечание. Позиция *8* — пазовый клин деревянный (бук. береза), текстолитовый или стеклотекстолитовый; размер по высоте 3,5—5,5 *мм*.

Таблица VII-11

Изоляция обмоток ротора асинхронных двигателей мощностью свыше 100 *квт*

Рисунок	Часть обмотки		Позиция на рисунке	Наименование материала: Класс А, нормальное исполнение	Наименование материала: Класс В, нормальное и усиленно-влагостойкое исполнения	Наименование материала: Классы F и H, все исполнения; класс В, тропическое и химически стойкое исполнения	Толщина, *мм*	Количество слоев на напряжение до 750 *в*: по ширине	до 750 *в*: по высоте	от 750 до 1 250 *в*: по ширине	от 750 до 1 250 *в*: по высоте	Толщина, *мм*, на напряжение до 750 *в*: по ширине	до 750 *в*: по высоте	от 750 до 1 250 *в*: по ширине	от 750 до 1 250 *в*: по высоте
	Пазовая	На один стержень		Лакировка стержней	Лакировка стержней	Лакировка стержней	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			1	Микафолий	Микафолий	Стекломикафолий	0,2	3,5 оборота		5,5 оборота		1,4	1,4	2,2	2,2
				Толщина изоляции стержня	—	—	—	—	—	—	—	1,5	1,5	2,3	2,3
		На паз	2	Электрокартон ЭВ	Электронит	Стеклолакоткань	0,15	2	2	2	2	0,3*	0,3*	0,3*	0,3*
			3	То же	»	Стеклотекстолит	0,5	—	3	—	3	—	1,5	—	1,5
				Допуск на укладку	—	—	—	—	—	—	—	0,3	0,6	0,3	0,6
				Всего на паз без клина	—	—	—	—	—	—	—	2,2*	5,5*	3,0*	7,1*
	Лобовая	На один стержень	4	Эскапоновая стеклолакоткань	Микалента	Стекломикалента	0,17	1 слой вполнахлеста		2 слоя вполнахлеста		0,68*	0,68	1,36	1,36
			5	Лента тафтяная (0,25)	Лента стеклянная	Лента стеклянная	0,1	1 слой вполнахлеста		1 слой вполнахлеста		0,4**	0,4**	0,4**	0,4**
				Толщина изоляции стержня	—	—	—	—		—		1,1**	1,1**	1,8**	1,8**

* Электрокартон ЭВ и стеклолакоткань имеют толщину 0,2 *мм*; поэтому толщина пазовой коробочки при их применении увеличивается на 0,1 *мм* (на обе стороны).

** Для изоляции класса А применяется тафтяная лента толщиной 0,25 *мм*; поэтому толщина изоляции лобовой части увеличивается на 0,6 *мм*. Изоляция пригодна для роторов реверсивных двигателей.

ОБМОТОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК ДЛЯ ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКИ Э. Д. С. И Н. С.

ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ШЕСТИЗОННОЙ ОБМОТКИ

$$k_o = k_p k_y,$$

где коэффициент распределения

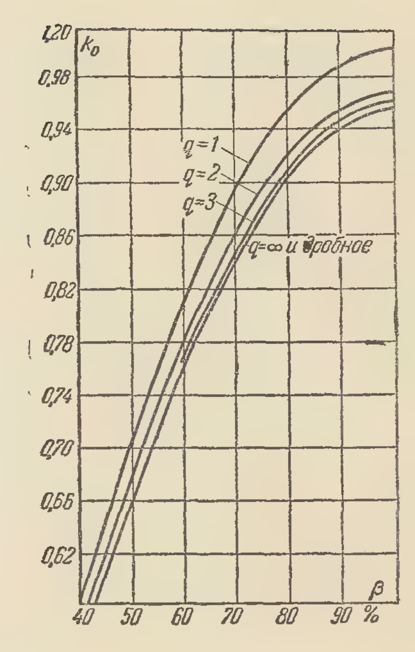
$$k_p = \frac{\sin 30°}{q \sin \frac{30°}{q}} = \frac{0,5}{q \sin \frac{30°}{q}}$$

(при q=целое число);

$$k_p = \frac{0,5}{N \sin \frac{30°}{N}} \left(\text{при } q = \frac{N}{d} = \text{дробное число}\right);$$

коэффициент укорочения

$$k_y = \sin \beta\, 90° \left(\beta = \frac{y}{\tau}\right).$$



Значения k_o и $k_y = k_o$ при $q = 1$ можно взять из кривых; значения k_p — из таблицы:

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
k_p	1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,957	0,956	0,955	0,955	0,955

ПРИЛОЖЕНИЕ IX

МАКСИМАЛЬНЫЕ (УГОННЫЕ) СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ

Тип машины	$n_{макс}$	Тип машины	$n_{макс}$
Генератор постоянного тока	$1,3n$	Асинхронный двигатель	$1,3n$
Двигатель с параллельным возбуждением	$1,5n$	Синхронный генератор	$1,3n$
		Турбогенератор	$1,2n$
Двигатель с последовательным возбуждением	$3,0n$	Гидрогенератор	См. гл. 14

Примечание. n — номинальная скорость вращения.

ПРИЛОЖЕНИЕ X

СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ РАЗМЕРЫ

Таблица X-1

Высота оси вращения электрических машин (*мм*) по ГОСТ 13267-67

25	40	63	100 112	180	280	450	710
28	45	71	132 (125)	200	315	500	800
32	50	80	(140)	225 (236)	355	560	900
36	56	90	160	250	400	(600) 630	1 000

Примечание. Высота оси вращения 125; 140; 236 *мм* применять только в технически обоснованных случаях, а высоту 600 *мм* — только для машин, разрабатываемых на базе существующих серий.

Таблица X-2

Концы валов цилиндрические электрических машин по ГОСТ 12080-66

Диаметр, *мм*	Длина, *мм*	Диаметр, *мм*	Длина, *мм*
6 8 10	16 20 23	25 28	60
12 14	30	30 32 36 38	80
16 18 19	40	40 42 45 48 50 55	110
20 22 24	50		

Продолжение табл. X-2

Диаметр, *мм*	Длина, *мм*	Диаметр, *мм*	Длина, *мм*
60 65 70 75	140	130 140 150	250
80 85 90 95	170	160 170 180	300
100 110 120 125	210	190 200 220	350

Примечание. Размеры, выделенные жирным шрифтом, следует предпочитать.

Таблица X-3

Нормальные диаметры и длины от 4 до 500 *мм* по ГОСТ 6636-60

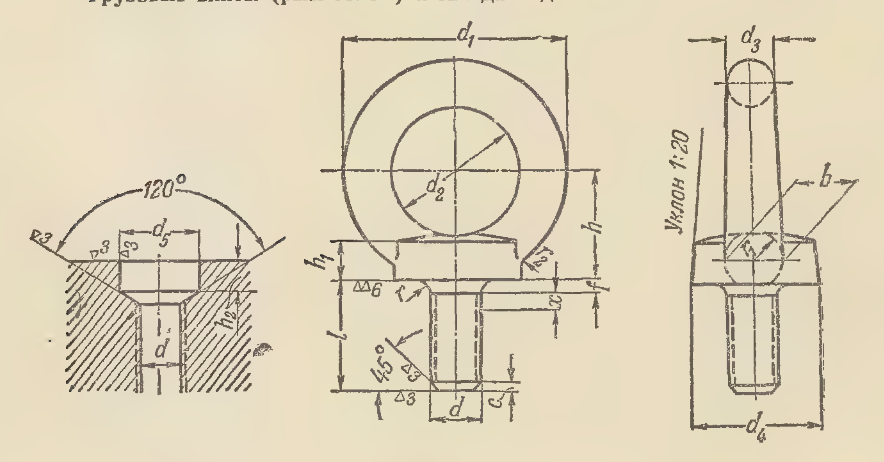
Ряд 5а	Ряд 10а		Ряд 20а				Ряд 40а							
4	4	5	4	4,5	5	5,5	4	4,2	4,5	4,8	5	5,2	5,5	5,8
6	6	8	6	7	8	9	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
10	10	12	10	11	12	14	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
16	16	20	16	18	20	22	16	17	18	19	20	21	22	24
25	25	32	25	28	32	36	25	26	28	30	32	34	36	38
40	40	50	40	45	50	55	40	42	45	48	50	52	55	58
60	60	80	60	70	80	90	60	65	70	75	80	85	90	95
100	100	120	100	110	120	140	100	105	110	115	120	130	140	150
160	160	200	160	180	200	220	160	170	180	190	200	210	220	240
250	250	320	250	280	320	360	250	250	280	300	320	340	360	380
400	400	500	400	450	500	—	400	420	450	480	500	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ XI

СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ ДЕТАЛИ

Таблица XI-1

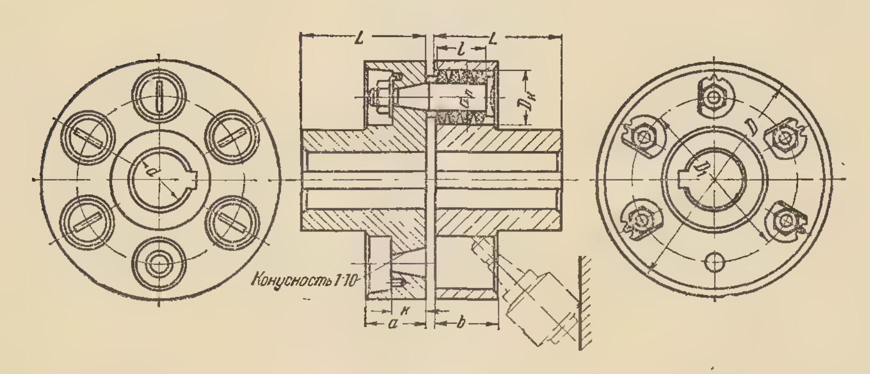
Грузовые винты (рым-болты) и гнезда под них по ГОСТ 4751-60



Резьба	Размеры, мм																Вес, кГ	Допустимая нагрузка, кГ
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	h	h_1	h_2	l	f	b	c	x	r	r_1	r_2		
M8	36	20	8	20	13	18	6	5	18	2	10	1,2	2,5	2	4	4	0,054	120
M10	45	25	10	25	15	22	8	6	21	2	12	1,5	3	2	5	4	0,110	200
M12	54	30	12	30	17	26	10	7	25	2	14	1,8	3,5	2	5	6	0,178	300
M16	63	35	14	35	22	30	12	8	32	2	16	2	4	2	6	6	0,295	550
M20	74	40	16	40	28	35	14	9	38	3	19	2,5	5	3	7	8	0,470	850
M24	90	50	20	50	32	45	16	10	45	3	21	3	6	3	9	12	0,863	1 250
M30	108	60	24	65	39	55	18	11	54	3	28	4	7	3	11	15	1,580	2 000
M36	120	70	28	75	46	65	22	12	61	4	32	4,2	8	4	13	18	2,440	3 000
M42	144	80	32	85	54	75	25	13	72	4	38	5	9	4	15	20	3,718	4 000
M48	162	90	36	95	60	82	30	14	82	4	42	6	10	4	18	20	5,540	5 000
M56	180	100	40	105	70	90	35	16	95	5	48	7	11	4	20	25	8,099	6 200

Таблица XI-2

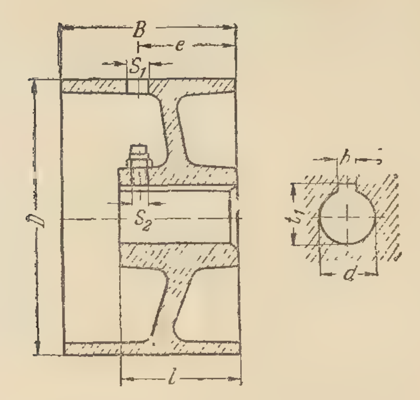
Муфты упругие



Обозначение	Наибольший момент, кГ·см	Число пальцев	Расточка под вал d, мм		Основные размеры, мм									
			минимальная	максимальная	D	D_1	d_n	D_k	c	L	l	a	b	k
МУВП1	360	4	12	18	90	60	10	20	2	42	15	24	22	12
МУВП2	630	6	16	22	100	70	10	20	2	52	15	24	22	12
МУВП3	1 320	4	19	28	120	82	14	28	2,5	62	28	30	35	16
МУВП4	2 360	6	24	38	140	100	14	28	2,5	82	28	30	35	16
МУВП5	4 230	6	30	38	160	110	18	36	3	82	36	40	45	22
МУВП6	7 250	8	35	55	190	140	18	36	3	112	36	40	45	22
МУВП7	13 500	8	40	55	225	160	24	46	4	112	44	55	55	28
МУВП8	20 600	10	50	75	260	195	24	46	4	112	44	55	55	28
МУВП9	28 200	8	60	75	295	210	30	58	5	142	56	70	70	36
МУВП10	41 200	10	70	95	330	245	30	58	5	175	56	70	70	36
МУВП11	58 000	8	80	95	365	265	38	72	6	175	72	82	90	44
МУВП12	83 400	10	90	120	405	305	38	72	6	215	72	82	90	44

Таблица XI-3

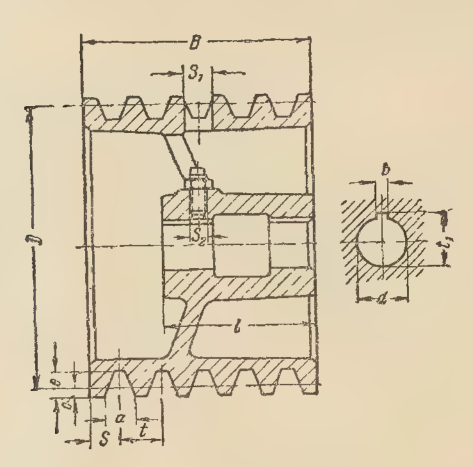
Размеры и вес ременных шкивов



Тип шкива	Размеры, *мм*									Вес, *кГ*
	B	b	D	d	e	l	S_2	S_1	t_1	
ШР-3	60	3	100	18	32	40	M6	8	20,2	1,2
ШР-4	85	8	125	25	50	60	M8	10	28,3	2,4
ШР-5	125	10	200	35	65	80	M10	12	38,8	7,8
ШР-6	150	14	250	45	93	110	M12	20	49,3	10,5
ШР-7-1	175	16	300	55	95	110	M12	20	60,3	16,5
ШР-7-2	175	16	400	55	95	110	M12	20	60,3	23,5
ШР-8-1	200	18	360	65	125	140	M12	20	70,8	26
ШР-8-2	200	18	450	65	125	140	M12	20	70,8	34
ШР-9-1	250	20	450	75	125	140	M12	20	81,3	40
ШР-9-2	250	20	560	75	125	140	M12	20	81,3	53

Таблица XI-4

Размеры и вес клиноременных шкивов



Тип шкива	Размеры, *мм*										Вес, *кГ*	Число ремней
	a	B	b	D	d	e	l	S	t	t_1		
ШК-3-1	10	30	5	90	18	10	40	9	12	20,2	1,2	2
ШК-3-2	10	42	5	90	18	10	40	9	12	20,2	1,5	3
ШК-4-1	13	56	8	100	25	13	60	12	16	28,3	2,2	3
ШК-4-2	13	72	8	100	25	13	60	12	16	28,3	2,6	4
ШК-5-1	17	72	10	140	35	17	80	15	21	38,8	4,8	3
ШК-5-2	17	114	10	140	35	17	80	15	21	38,8	6,7	5

Тип шкива	Размеры, *мм*										Вес, *кГ*	Число ремней
	a	*B*	*b*	*D*	*d*	*e*	*l*	*S*	*t*	t_1		
ШК-6-1	17	114	14	180	45	17	110	15	21	49,3	13	5
ШК-6-2	17	156	14	180	45	17	110	15	21	49,3	16	7
ШК-7-1	22	144	16	250	55	22	110	18	27	60,3	26	5
ШК-7-2	22	198	16	250	55	22	110	18	27	60,3	33	7
ШК-8-1	32	198	18	315	65	30	140	23	38	70,8	52	5
ШК-8-2	32	236	18	315	65	30	140	23	38	70,8	57	6
ШК-9-1	32	236	20	400	75	30	140	23	38	81,3	53	6
ШК-9-2	32	312	20	400	75	30	140	23	38	81,3	67	8

ПРИЛОЖЕНИЕ XII

ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Таблица XII-1

Шарикоподшипники радиальные однородные, ГОСТ 8338-57 (рис. 9-65)

Условное обозначение подшипника	*d, мм*	*D, мм*	*B, мм*	*r, мм*	*C*	*n, об/мин*
			Легкая серия			
200	10	30	9	1	7 000	20 000
201	12	32	10	1	7 100	20 000
202	15	35	11	1	8 500	16 000
203	17	40	12	1	11 300	16 000
204	20	47	14	1,5	15 000	16 000
205	25	52	15	1,5	16 000	13 000
206	30	62	16	1,5	22 000	13 000
207	35	72	17	2,0	30 000	10 000
208	40	80	18	2,0	39 000	10 000
209	45	85	19	2,0	39 000	8 000
210	50	90	20	2,0	42 000	8 000
211	55	100	21	2,5	52 000	8 000
212	60	110	22	2,5	62 000	6 000
213	65	120	23	2,5	68 000	6 000
214	70	125	24	2,5	74 000	5 000
215	75	130	25	2,5	78 000	5 000
216	80	140	26	3,0	84 000	5 000
217	85	150	28	3,0	98 000	4 000
218	90	160	30	3,0	112 000	4 000
219	95	170	32	3,5	124 000	4 000
220	100	180	34	3,5	136 000	3 000
			Средняя серия			
300	10	35	11	1,0	10 000	16 000
301	12	37	12	1,5	12 300	16 000
302	15	42	13	1,5	13 500	16 000
303	17	47	14	1,5	17 100	13 000
304	20	52	15	2,0	19 000	13 000
305	25	62	17	2,0	27 000	10 000
306	30	72	19	2,0	33 000	10 000
307	35	80	21	2,5	40 000	8 000
308	40	90	23	2,5	48 000	8 000
309	45	100	25	2,5	57 000	6 000
310	50	110	27	3,0	72 000	6 000
311	55	120	29	3,0	84 000	6 000

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C	n, об/мин
312	60	130	31	3,5	94 000	5 000
313	65	140	33	3,5	106 000	5 000
314	70	150	35	3,5	120 000	5 000
315	75	160	37	3,5	132 000	4 000
316	80	170	39	3,5	144 000	4 000
317	85	180	41	4,0	158 000	4 000
318	90	190	43	4,0	170 000	3 000
319	95	200	45	4,0	182 000	3 000
320	100	215	47	4,0	210 000	3 000
321	105	225	49	4,0	230 000	2 500
322	110	240	50	4,0	260 000	2 500
324	120	260	55	4,0	270 000	2 500
326	130	280	58	5,0	290 000	2 500
328	140	300	62	5,0	320 000	2 000
Тяжелая серия						
403	17	62	17	2,0	29 000	10 000
405	25	80	21	2,5	47 000	8 000
406	30	90	23	2,5	60 000	8 000
407	35	100	25	2,5	68 000	6 000
408	40	110	27	3,0	78 000	6 000
409	45	120	29	3,0	92 000	6 000
410	50	130	31	3,5	108 000	5 000
411	55	140	33	3,5	120 000	5 000
412	60	150	35	3,5	132 000	5 000
413	65	160	37	3,5	144 000	4 000
415	75	190	45	4,0	194 000	4 000
416	80	200	48	4,0	210 000	3 000

Таблица XII-2

Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами, ГОСТ 8328-57 (рис. 9-66)

Условное обозначение подшипника			d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C	n, об/мин
Тип 2000	Тип 32 000	Тип 42 000						
Легкая узкая серия								
2202	32 202	42 202	15	35	11	0,5	8 000	16 000
2204	32 204	42 204	20	47	14	1,5	18 000	16 000
2205	32 205	42 205	25	52	15	1,5	20 000	13 000
2206	32 206	42 206	30	62	16	1,5	27 000	13 000
2207	32 207	42 207	35	72	17	2,0	39 000	10 000
2208	32 208	42 208	40	80	18	2,0	50 000	10 000
2209	32 209	42 209	45	85	19	2,0	54 000	8 000
2210	32 210	42 210	50	90	20	2,0	57 000	8 000
2211	32 211	42 211	55	100	21	2,5	70 000	8 000
2212	32 212	42 212	60	110	22	2,5	84 000	6 000
2213	32 213	42 213	65	120	23	2,5	98 000	6 000
2214	32 214	42 214	70	125	24	2,5	98 000	5 000
2215	32 215	42 215	75	130	25	2,5	120 000	5 000
2216	32 216	42 216	80	140	26	3,0	132 000	5 000
2217	32 217	42 217	85	150	28	3,0	152 000	4 000
2218	32 218	42 218	90	160	30	3,0	188 000	4 000
2219	32 219	42 219	95	170	32	3,5	210 000	4 000
2220	32 220	42 220	100	180	34	3,5	230 000	3 000

Условное обозначение подшипника			d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C	n, об/мин
Тип 2000	Тип 32 000	Тип 42 000						
2221	32 221	42 221	105	190	36	3,5	250 000	3 000
2222	32 222	42 222	110	200	38	3,5	310 000	3 000
2224	32 224	42 224	120	215	40	3,5	350 000	3 000
2226	32 226	42 226	130	230	40	4,0	360 000	2 500
2228	32 228	42 228	140	250	42	4,0	420 000	2 500
Средняя узкая серия								
2305	32 305	42 305	25	62	17	2,0	35 000	10 000
2306	32 306	42 306	30	72	19	2,0	45 000	10 000
2307	32 307	42 307	35	80	21	2,5	54 000	8 000
2308	32 308	42 308	40	90	23	2,5	66 000	8 000
2309	32 309	42 309	45	100	25	2,5	90 000	8 000
2310	32 310	42 310	50	110	27	3,0	100 000	6 000
2311	32 311	42 311	55	120	29	3,0	132 000	6 000
2312	32 312	42 312	60	130	31	3,5	158 000	5 000
2313	32 313	42 313	65	140	33	3,5	170 000	5 000
2314	32 314	42 314	70	160	35	3,5	200 000	5 000
2315	32 315	42 315	75	160	37	3,5	230 000	4 000
2316	32 316	42 316	80	170	39	3,5	240 000	4 000
2317	32 317	42 317	85	180	41	4,0	290 000	4 000
2318	32 318	42 318	90	190	43	4,0	320 000	3 000
2319	32 319	42 319	95	200	45	4,0	340 000	3 000
2320	32 320	42 320	100	225	47	4,0	400 000	3 000
2322	32 322	42 322	110	240	50	4,0	520 000	2 500
2324	32 324	42 324	120	260	55	4,0	650 000	2 500
2326	32 326	42 326	130	280	58	5,0	730 000	2 500
2328	32 328	42 328	140	300	62	5,0	800 000	2 000
2332	32 332	42 332	160	340	68	5,0	950 000	2 000
2336	32 336	42 336	180	380	75	5,0	1 260 000	1 600
2340	32 340	42 340	200	420	80	6,0	1 340 000	1 600
Средняя широкая серия								
2605	32 605	42 605	25	62	24	2,0	46 000	10 000
2606	32 606	42 606	30	72	27	2,0	54 000	10 000
2607	32 607	42 607	35	80	32	2,5	66 000	8 000
2608	32 608	42 608	40	90	33	2,5	84 000	8 000
2609	32 609	42 609	45	100	36	2,5	124 000	8 000
2610	32 610	42 610	50	110	39	2,5	145 000	6 000
2611	32 611	42 611	55	120	43	3,0	158 000	6 000
2612	32 612	42 612	60	130	46	3,5	196 000	5 000
2613	32 613	42 613	65	140	48	3,5	220 000	5 000
2615	32 615	42 615	75	160	55	3,5	310 000	4 000
2616	32 616	42 616	80	170	58	3,5	330 000	4 000
2617	32 617	42 617	85	180	60	4,0	380 000	4 000
2618	32 618	42 618	90	190	64	4,0	400 000	3 000
2620	32 620	42 620	100	215	73	4,0	540 000	3 000
2622	32 622	42 622	110	240	80	4,0	730 000	2 500
2624	32 624	42 624	120	260	86	4,0	890 000	2 500
2626	32 626	42 626	130	280	93	5,0	1 070 000	2 500
2630	32 630	42 630	150	320	108	5,0	1 260 000	2 000
2634	32 634	42 634	170	360	120	5,0	1 660 000	1 600
Тяжелая серия								
2410	32 410	42 410	50	130	31	3,5	170 000	5 000
2411	32 411	42 411	55	140	33	3,5	180 000	5 000
2412	32 412	42 412	60	150	35	3,5	220 000	5 000
2413	32 413	42 413	65	160	37	3,5	240 000	4 000
2414	32 414	42 414	70	180	42	4,0	310 000	4 000

Условное обозначение подшипника			d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C	n, об/мин
Тип 2000	Тип 32 000	Тип 42 000						
2416	32 416	42 416	80	200	48	4,0	400 000	3 000
2417	32 417	42 417	85	210	52	5,0	460 000	3 000
2418	32 418	42 418	90	225	54	5,0	520 000	3 000
2419	32 419	42 419	95	240	55	5,0	540 000	3 000
2420	32 420	42 420	100	250	58	5,0	630 000	2 500
2421	32 421	42 421	105	260	60	5,0	670 000	2 500
2422	32 422	42 422	110	280	65	5,0	760 000	2 500
2424	32 424	42 424	120	310	72	6,0	980 000	2 500
—	32 426	42 426	130	340	78	6,0	1 260 000	2 000
—	32 428	42 428	140	360	82	6,0	1 340 000	2 000
—	32 430	42 430	150	380	85	6,0	1 440 000	1 600

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 1. Трансформаторы, изд. 2-е. Госэнергоиздат, 1956.
2. Петров Г. Н. и др., Электрические машины, ГЭИ, 1940.
3. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 2, Коллекторные машины постоянного и переменного тока, Госэнергоиздат, 1947.
4. Костенко М. П. и Пиотровский Л. М., Электрические машины, ч. 1 и 2, изд-во «Энергия», 1964 и 1965.
5. Костенко М. П., Электрические машины (специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.
6. Петров Г. Н., Электрические машины, ч. 2, Асинхронные и синхронные машины, Госэнергоиздат, 1963.
7. Толвинский В. А., Электрические машины постоянного тока, Госэнергоиздат, 1956.
8. Алексеев А. Е., Конструкция электрических машин, Госэнергоиздат, 1958.
9. Постников И. М., Проектирование электрических машин, Киев, ГИТЛ, 1960.
10. Справочная книга для электротехников (СЭТ), т. 5 и 6, изд-во КУБУЧ, 1934.
11. Вольдек А. И., Электрические машины, изд-во «Энергия», 1966.
12. Сергеев П. С., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1962.
13. Арнольд Э. и Лакур, Машины постоянного тока, т. 2, ГНТИ, 1931.
14. Рихтер Р., Электрические машины, т. 1, 2, 4, ОНТИ, 1935—1939.
15. Лившиц М., Электрические машины, т. 2 и 3, Госэнергоиздат, 1936.
16. Трапезников В. А., Основы проектирования серии асинхронных машин, ОНТИ, 1937.
17. Ciganek L., Stavba elektrickych stroju, Praha, 1958.
18. Шуйский В., Расчет электрических машин, изд-во «Энергия», 1968.
19. Расчет серии асинхронных двигателей на автоматической цифровой вычислительной машине, сб. ЦИНТИэлектропром, Москва, 1962.
20. Применение электронно-вычислительной техники при расчетах электрических машин. сб. «Электросила», 1966, № 25.
21. Сталь электротехническая тонколистовая, ГОСТ 802-58.
22. Дружинин В. В., Магнитные свойства электротехнической стали, Госэнергоиздат, 1962.
23. Материалы электроизоляционные для электрических машин, трансформаторов и аппаратов (классификация по нагревостойкости), ГОСТ 8865-58.
24. Изоляция электрических машин, сб. ЦИНТИэлектропром, Москва, 1961, № 6.
25. Калитвянский В. И., Изоляция электрических машин, Госэнергоиздат, 1949.
26. Калитвянский В. И. и Ковальская А. В., Продолжительность службы новых видов изоляции электрических машин, «Электричество», 1955, № 10.
27. Бернштейн Л. М., Изоляция электрических машин общепромышленного применения, изд-во «Энергия», 1965.
28. Бернштейн Л. М., О конструировании и технологии изготовления секций обмоток статора высоковольтных электродвигателей, «Вестник электропромышленности», 1958, № 2.
28а. Петров Г. Н. и Абрамов А. И., Междувитковые перенапряжения в обмотках электрических машин при волновых перенапряжениях, «Электричество», 1954, № 7.
29. Привезенцев В. А., Обмоточные провода, Госэнергоиздат, 1952.
30. Трабский А. В. и др., Бандажная нетканая стеклолента и применение новых термореактивных связующих, сб. «Электротехническая промышленность», ЦИНТИэлектропром, 1952, № 11.
31. Белкин М. Д. и Штыхнов С. Г., Щетки для электрических машин, их производство и применение, Госэнергоиздат, 1952.
32. Щетки для электрических машин (марки и технические требования), ГОСТ 2332-63.
33. Щетки для электрических машин (типы и размеры), ГОСТ 12232-66.
34. Рихтер Р., Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока, Госэнергоиздат, 1933.
35. Зимин В. И. и др., Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.
36. Кучера Я. и Гапл Й., Обмотки электрических вращательных машин, Прага, изд. Чехословацкой академии наук, 1963.
37. Sequens H., Die Wicklungen elektrischer Maschinen. Wien. J. Springer, 1952.
38. Левитус А. И., Лягушечья обмотка и ее различные исполнения, «Вестник электропромышленности», 1940, № 1.
39. Касьянов В. Т., О свойствах, применении и проектировании простейших и сложных лягушечьих обмоток, сб. «Электросила», 1947, № 4.

40. Ипатов П. М., Асимметрия трехходовых петлевых обмоток якорей машин постоянного тока, «Вестник электропромышленности», 1959, № 12.
Асимметрия петлевых двухходовых однократнозамкнутых обмоток якорей машин постоянного тока, «Вестник электропромышленности», 1960, № 3.
41. Рабинович И. Н., О допустимой несимметрии двухходовых петлевых обмоток машин постоянного тока, сб. «Электросила», 1957, № 15.
42. Кашин А. А., Выполнение уравнительных соединений в петушках крупных машин постоянного тока, сб. «Электросила», 1947, № 4.
43. Касьянов В. Т. и Риммер П. Б., Уравнительные соединения кратных волновых обмоток машин постоянного тока, сб. «Электросила», 1952, № 11.
44. Лившиц М., Обмотки машин переменного тока, Госэнергоиздат, 1958.
45. Касьянов В. Т., Составление схем петлевых и волновых обмоток трехфазного тока, сб. «Электросила», 1949, № 6.
46. Касьянов В. Т., Составление некоторых специальных схем трехфазных волновых обмоток, сб. «Электросила», 1951, № 8.
47. Ипатов П. М., Упрощенный способ составления схем трехфазных волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, сб. «Электросила», 1954, № 12.
Практический способ составления схем волновых обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, «Вестник электропромышленности», 1952, № 9.
Построение рациональных схем волновых обмоток статора синхронного генератора с дробным числом пазов на полюс и фазу, сб. «Электросила». 1959, № 17.
48. Церебеж И. Ю., Упрощенная схема соединения трехфазных волновых обмоток стержневого типа, «Вестник электропромышленности», 1951, № 12.
49. Кузнецов Б. И., О влиянии толщины изоляции на степень использования электрических машин, «Вестник электропромышленности», 1956, № 4.
50. Рабинович И. Н., Машины постоянного тока с эксцентричным зазором под главным полюсом, сб. «Электросила», 1964, № 24.
51. Костенко М. П. и Коник Б. Е., Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины, «Электричество», 1951, № 3.
52. Данилевич Я. Б. и др., Параметры электрических машин переменного тока, изд-во «Наука», 1965.
53. Сорокер Т. Г., Дифференциальное рассеяние многофазных асинхронных двигателей, «Вестник электропромышленности», 1956, № 6.
54. Сорокер Т. Г., Многофазный асинхронный двигатель и преобразователь частоты (поверочный расчет), НИИэлектропром, 1959.
55. Телаат М. Е., Новый подход к определению индуктивных сопротивлений синхронной машины, Госэнергоиздат, 1959.
56. Liwschitz M., Differential leakage with respect to the fundamental wave and to the harmonics, Trans. AIEE, 1944, v. 63, p. 1134—1150.
57. Liwschitz M., Differential leakage of a fractionalslot winding, Trans. AIEE, 1946, v. 65, p. 314—320.
58. Данилевич Я. Б. и Кашарский Э. Г., Добавочные потери в электрических машинах, Госэнергоиздат, 1963.
59. Геллер Б. и Гамата В., Дополнительные поля, моменты и потери мощности, изд-во «Энергия», 1964.
60. Машины электрические, общие технические требования, ГОСТ 183-66.
61. Машины электрические, методы испытания, ГОСТ 11826-66.
62. Машины электрические постоянного тока, методы испытания, ГОСТ 10159-62.
63. Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 100 *вт* и выше, методы испытания, ГОСТ 7217-66.
64. Машины электрические синхронные трехфазные, методы испытания, ГОСТ 10160-62.
65. Генераторы электрические гидротурбинные (гидрогенераторы), технические требования, ГОСТ 5616-63.
66. Генераторы электрические паротурбинные двухполюсные (турбогенераторы), технические условия (изд. 1966 г.), ГОСТ 533-51.
67. Формуляры механических расчетов узлов и деталей электрических машин, Ленинград, БТИ завода «Электросила», 1952.
68. Красовский Б. Н., Вопросы прочности электрических машин, изд. АН СССР, 1951.
69. Шлыгин В. В., Прочностные и размерные расчеты электрических машин, Госэнергоиздат, 1963.
70. Кожешник Я., Механика вращающихся электрических машин, Госэнергоиздат, 1962.
70а. Костин К. Ф., Вертикальные гидрогенераторы для сельских ГЭС. Госэнергоиздат, 1955.
71. Одинг И. А., Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Машгиз, 1962.
72. Фиш А. Я. и др., Коллекторы электрических машин на пластмассе, Госэнергоиздат, 1963.
73. Егоров Б. А., Производство и ремонт коллекторов крупных электрических машин, Госэнергоиздат, 1959.
74. Виноградов Н. В., Производство электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.
75. Блюменкранц Д. М., Зунделович М. И., Прутковский С. А., Фомин Б. П., Циханович Б. Т., Виро Г. И., Технология крупного электромашиностроения, Турбогенераторы, ч. 1; Гидрогенераторы, ч. 2; Крупные машины, ч. 3, изд-во «Энергия», 1966.
76. Филиппов И. Ф., Вопросы охлаждения электрических машин, изд-во «Энергия», 1964.
77. Москвитин А. И., Непосредственное охлаждение электрических машин, АН СССР, 1962.

78. Теплоотдача и охлаждение электрических машин, сб. ЦИНТИэлектропром, 1963.

79. Лютер Р. А. и др., О термической стойкости электрических машин переменного тока с короткозамкнутыми системами в роторе, сб. «Электросила», 1957, № 15.

80. Охлаждение турбо-гидрогенераторов, сб. ЦИНТИэлектропром, 1959.

81. Готтер Г., Нагревание и охлаждение электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

82. Иванов Н. П. и Филиппов И. Ф., Метод теплового расчета электрических машин с непосредственным охлаждением, «Электричество», 1963, № 1.

83. Иоффе А. Б., Тяговые электрические машины, изд-во «Энергия», 1965.

84. Рабинович А. А. и др., Крано-во-металлургические электродвигатели, изд-во «Энергия», 1967.

85. Расчет машин постоянного тока, Ленинград, БТИ завода «Электросила», 1948.

86. Касьянов В. Т., Расчет машин постоянного тока, Ленинград, 1952.

87. Жерве Г. К., Расчет машин постоянного тока при перемотке. Госэнергоиздат, 1952.

88. Рабинович И. Н. и Шубов И. Г., Проектирование электрических машин постоянного тока, изд-во «Энергия», 1967.

89. Гурин Я. С. и Курочкин М. Н., Проектирование машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.

90. Касьянов В. Т., Машины постоянного тока предельной и большой мощности, «Вестник электропромышленности», 1939, № 5.

91. Касьянов В. Т. и др., Машины постоянного тока предельного использования по мощности и некоторые вопросы их проектирования, «Вестник электропромышленности», 1948, № 11.

92. Вегнер О. Г., Теория и практика коммутации машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1961.

93. Юдицкий С. Б., Коммутация машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1941.

94 Ермолин Н. П., Электрические машины малой мощности, «Высшая школа», 1957.

95. Puchstein A. F., The design of small direct current motors, New York, 1961.

96. Greenwood L., Design of direct-current machines, London, 1949.

97 Расчет трехфазных асинхронных двигателей, Ленинград, БТИ завода «Электросила», 1951.

98 Зимин В. И., Расчет асинхронных двигателей, Ленинград, 1940.

99 Alger Ph. L., The nature of polyphase induction machines, New York, 1951.

100 Nürnberg W., Die Asynchronmaschine, Berlin, 1952.

101 Schuisky W., Induktionsmaschinen, Wien, 1957

102 Norman H. M., Induction motor locked saturation curves, El Eng, April, 1934

103 Agarwal P. D and Alger P. L., Saturation factors for leakage reactance of induction motors, Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs, III, v. 79, p.1037—1042, 1961.

104. Иванов Н. П. и др., Короткозамкнутые асинхронные электродвигатели с одной клеткой из стержней специального профиля, сб. «Электросила», 1955, № 13.

105. Харитонов А. М., Многоскоростные двигатели, Госэнергоиздат, 1954.

106. Лопухина Е. М. и Сомихина Г. С., Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока, Госэнергоиздат, 1961.

107. Veinott C. G., Theory and design of small induction motors, New York, 1959.

108. Расчет явнополюсных синхронных машин, Ленинград, БТИ завода «Электросила», 1948.

109. Касьянов В. Т., Расчет явнополюсных синхронных машин, Ленинград, 1951.

110. Абрамов А. И. и Иванов-Смоленский А. В., Расчет и конструирование гидрогенераторов, изд-во «Высшая школа», 1964.

111. Домбровский В. В. и др., Проектирование гидрогенераторов, ч. I и 2, изд-во «Энергия», 1965 и 1968.

112. Алексеев А. Е., Костенко М. П., Турбогенераторы, Госэнергоиздат, 1939.

113. Сергеев П. С., Проектирование турбогенераторов, Москва, изд. МЭИ, 1961.

113а. Хуторецкий Г. М., Проектирование турбогенераторов, Ленинград, изд. ЛПИ, 1962.

114. Титов В. В. и др., Турбогенераторы (расчет и конструкции), изд-во «Энергия», 1967.

115. Матюхин В. М., Новая эквивалентная схема синхронной машины с выступающими полюсами, Известия АН СССР, ОТН, 1948, № 4.

116. Толмач И. М., Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей по схеме замещения, «Электричество», 1956, № 1.

117. Жерихин И. П., Расчет пусковых клеток синхронных двигателей, Известия Ленинградского электротехнического института, вып. 27, 1955.

117а. Данилевич Я. Б., Кулик Ю. А Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин, изд. АН СССР, 1962

118 Чемоданова Н. Б., Расчет параметров и пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин с массивными полюсами, «Вестник электропромышленности», 1961, № 5

119. Лютер Р. А., Самойлович Н Я., Коган В. В., Расчет асинхронных моментов вращения двухполюсных двигателей с магнитными бандажами, сб. «Электросила», 1962, № 21

Асинхронные моменты вращения машины с массивным ротором и немагнитными бандажами, сб. «Электросила», 1965, № 24

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ


Цена 3 р. 02 к.